

KRIEG IM AETHER

Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
im Wintersemester 1981/1982

Leitung:

Bundesamt für Übermittlungstruppen

Divisionär J. Biedermann, Waffenchef der Übermittlungstruppen

Digitale Richtfunksysteme

Referent: R. Steinhart, Dr., Ing.

I - I

DIGITALE RICHTFUNKSYSTEME

R. Steinhart, Dr. Ing.

INHALTSVERZEICHNIS

1. DIE AUFGABE DES RICHTFUNKS
2. MOEGlichkeiten MEHRSTUFIGER UEBERTRAGUNG
3. DAS VERHALTEN DES FUNKFELDES
4. VORTEILE DER DIGITALEN RICHTFUNKUEBERTRAGUNG
5. ZIVILE RICHTFUNKGERAETE
6. MILITAERISCHE RICHTFUNKGERAETE

Adresse des Autors:

Rudolf Steinhart, Dr. Ing.
AEG-Telefunken Nachrichtentechnik GmbH
D-7150 Backnang

"Krieg im Aether", Folge XXI

I-2

1. DIE AUFGABE DES RICHTFUNKS

Der Richtfunk als Weitverkehrs-Nachrichtensystem hat als Aufgabe, Telefongespräche, Daten, Fernsehbilder und Tonprogramme zu übertragen. Die weitaus überwiegende Menge dieser Informationen sind in ihrer Quelle analoge Signale und deshalb erfolgt die Uebertragung gegenwärtig überwiegend über analoge Netze.

Betrachtet man zunächst die von den vorgenannten Signalen her gestellte Uebertragungsaufgabe bezüglich ihrer Basisbandbreite: Ein Telefonkanal hat bekanntlich eine Bandbreite von 300 bis 3400 Hz. Bereitet man diese trägerfrequent auf, so gibt man jedem Kanal eine Bandbreite von 4 kHz, d.h. dem Uebertragungsmedium - hier also dem Richtfunk - wird, je nach der TF-Hierarchie ein analoges Basisband von $n \times 4$ kHz angeliefert. Die Basisbandbreite beträgt bei 300 Sprechkanälen 1,3 MHz, bei 1800 Sprechkanälen 8 MHz und bei 2700 Sprechkanälen 12 MHz. Anstelle eines Telephoniekanals können auch mit Hilfe von Datenmodems - je nach dem Tastverfahren - bis zu 9,6 kbit/s übertragen werden. Ein TV-Bild liefert einschliesslich Farbhilfsträger ein Basisband von 5 MHz, ein hochwertiger Ton-Programmkanal hat eine Bandbreite von 15 kHz.

Der Richtfunk hat nun diese analogen Basisband-Signale nicht ungeändert in die RF-Frequenzebene umgesetzt, vielmehr wurde in aller Regel Frequenzmodulation (FM) angewandt, und zwar deshalb, weil FM ein geräuschminderndes Modulationsverfahren ist, welches ursprünglich die Idee überhaupt war, Signale grösserer Bandbreite wirtschaftlich und mit hoher Qualität über Richtfunk zu übertragen. Die Entwicklung von FM-Systemen höchster Uebertragungskapazität hat dann etwa Mitte der 70er Jahre mit dem Einsatz von Anlagen zur Uebertragung von 2700 Kanälen im 6,7 GHz-Bereich ihren Höhepunkt und aber auch ihren vorläufigen Abschluss gefunden.

Signal	Basisband- breite	FM-Band- breite	PCM Bitrate	"PCM-Bandbreite" NF-Bandbreite
Sprache (Telefonkanal)	4 kHz	14-21 kHz	64 kbit/s	>15
Daten (z.B. 2,4 kbit/s)	4 kHz	14-21 kHz	2,4 kbit/s	<1
Ton (Programmkanal)	15 kHz	~ 180 kHz	420 kbit/s	~ 28
TV (BAS-Signal)	5 MHz	~ 21 MHz	84 Mbit/s	~17

Fig. 1 RF-Uebertragungsaufgabe-Bandbreiten

Die Vorteile der FM wurden durch erhöhten Bandbreitenbedarf in der RF-Ebene erkaufte. Die Zahlenwerte der Figur 1 sind nur typische Richtwerte, da sie im Einzelfall vom speziellen Richtfunksystem abhängen. Man braucht sie im Detail hier auch gar nicht zu diskutieren, weil der dargestellte Vergleich direkt zeigt, dass die RF-Bandbreite ein Mehrfaches der NF-Bandbreite ist. Unter Anwendung des FM-Modulationsverfahrens und unter Optimierung des Frequenzbandbreitenbedarfs durch Reduzierung des effektiven Frequenzhubes war es dem Richtfunk möglich, die ihm gestellten Uebertragungsaufgaben so zu lösen, dass die Uebertragungskapazität in den postalischen Frequenzbereichen von ca. 2 bis 12 GHz je RF-Station über 100 000 Sprechkanäle beträgt, bzw. betragen würde, wenn alle Systeme ausgebaut wären.

Die Einführung digitaler Systeme ändert an der oben erklärten Uebertragungsaufgabe grundsätzlich nichts, und doch beginnt, ebenso wie für alle andern Teilsysteme der Fernmeldetechnik, auch für den Richtfunk ein neues Leben.

Betrachten wir zunächst wieder die Uebertragungsaufgabe (Fig.1): Ein Sprechkanal der analogen Bandbreite von 4 kHz wird ersetzt durch einen Bitstrom von 64 kbit/s. Würde man diesen Bitstrom direkt einem RF-Träger aufmodulieren, so würde für jedes Bit dieses digitalen Signales ein von zwei möglichen Zuständen des Trägers benötigt, d.h. für einen Sprechkanal von 64 kbit/s wäre also numerisch eine Bandbreite von 64 kHz erforderlich, das wäre also mehr als das 15-fache der analogen

I-3

Basisbandbreite und das 4- bis 5-fache der FM-Bandbreite. Würde man auf diesem Wege ein 2700-Kanal-PCM-System bauen wollen, so wäre bei dieser Art eine RF-Bandbreite von 170 MHz hierfür erforderlich. Für einen 15 kHz Tonkanal sieht es bei dieser Betrachtung natürlich auch nicht anders aus: Bei 2-facher Abtastung je Schwingung und aus Qualitätsgründen mit 14 Quantisierungsstufen ergeben sich rund 400 kbit/s für einen einzigen Tonkanal und in gleicher Weise ca. 84 Mbit/s für einen TV-Kanal.

Diese Zahlenwerte könnte man bei Anwendung des oben genannten "Primitiv-Richtfunks" numerisch direkt in Frequenzbedarf, also 400 kHz bzw. 84 MHz umschreiben, und es ist anschaulich evident, dass bei solch riesigen Bandbreiten der Richtfunk sich mit der Einführung der digitalen Signalübertragung alsbald selbst verbieten würde, da er sich in der Luft blockiert. Hierbei ist die Wirtschaftlichkeit noch gar nicht in Betracht gezogen. Ein besonderer Fall in der Figur 1 ist die Datenübertragung. Hier geht der Bandbreitenbedarf beim Uebergang zur digitalen Uebertragung wesentlich herunter, nämlich auf die originale Bitrate von (z.B.) 2,4 kbit/s, entsprechend 2,4 kHz. Dieser Fall zeigt sehr anschaulich die Unterschiedlichkeit der Quellen. Daten sind originär digitale Quellen, die im analogen Uebertragungsnetz gewissermassen "artfremd" waren. Sprache, Ton und TV-Bilder sind dagegen in ihrer Quelle analog und wir sehen an den vorgenannten Bandbreiten, dass nur diese Signale in vergleichsweise sehr hohe Bitraten umgesetzt werden müssen. Der Richtfunk muss also erhebliche Anstrengungen unternehmen, um von diesen für die analogen Signale erforderlichen enormen Bandbreiten wegzukommen.

Der nächstliegende Weg ist der, dass man auf dem Uebertragungsweg den einfachen binären Code verlässt und mehr als nur zwei Uebertragungszustände einführt. Fasst man beispielsweise zwei binäre Zeichen zusammen und ordnet man jedem so entstandenen binären Zeichenpaar einen Zustand des Uebertragungsweges zu, so sind also 4 Zustände erforderlich; dafür ist aber die Uebertragungsgeschwindigkeit dieser Zeichenpaare nur noch halb so gross wie die Bitrate der Binärzeichen. Man nennt das auch "die Baudrate ist halb so gross wie die Bitrate".

2. MOEGlichkeiten MEHRSTUFIGER UEBERTRAGUNG

Der Richtfunk hat eine besonders günstige Möglichkeit, die mehrstufige Uebertragung zu realisieren. Es ist ohnehin eine Trägerfrequenz vorhanden, nämlich z.B. die RF-Uebertragungsfrequenz, und diese kann man auf verschiedene Weise modulieren, bzw. im digitalen Fall umtasten. Man kann die Trägerwelle in seiner Frequenz tasten (FSK), man kann die Amplitude (ASK) oder man kann auch den Phasenwinkel tasten (PSK).

In dem vorhin betrachteten Fall sind 4 Zustände erforderlich und wählt man den Phasenwinkel als Uebertragungscode, so spricht man von 4-Phasentastung als Modulationsverfahren (PSK), und man hat auf diesem Weg die Uebertragungsbandbreite -rechnerisch- auf die Hälfte reduziert. Zumindest beim ersten Hinsehen erscheint dieser Weg als geradezu ideal, um eine beliebig hohe Bandnutzung zu erreichen und man braucht nur zu fragen, wieviel Stufen man einführen will. Eine wenn auch nur theoretische aber absolut befriedigende Endlösung wäre sicher dann erreicht, wenn der Richtfunk in der Luft nicht mehr Frequenzbandbreite belegen würde als das ursprüngliche (analoge) Basisbandsignal, eine Forderung, die allerdings auch von FM-Systemen nicht erfüllt wird. Diese Frage ist rechnerisch sehr schnell beantwortet: Gibt man vor, dass man für einen NF-Kanal von 4kHz Bandbreite auch bei digitaler Aufbereitung mit 64 kbit/s nur 4 kHz Bandbreite belegen darf, so müsste man also

$$\frac{64 \text{ kbit/s}}{4 \text{ kHz}} = 16 \text{ bit/s/Hz}$$

übertragen. Da man für n zusammengefasste Zeichen 2^n Trägerzustände benötigt, braucht man also für die gewünschte "Endlösung" ein Modulationsverfahren mit "nur" $2^{16} = 65\,536$ (voneinander unterscheidbaren) Zuständen. Natürlich geht das nicht, denn niemand kann ein Modulationsverfahren mit 65 000 Zuständen entwickeln und anwenden.

An diesen Ueberlegungen sieht man aber bereits, dass die direkte, einfache Umsetzung der PCM-Bitströme in die Richtfunkebene aus Frequenzbedarfgründen nicht geht, und dass andererseits die Bitzusammenfassung -d.h. Vielstufigkeit- nach oben sehr starke Grenzen aufweist. Eine beliebige Bandreduktion ist auf diesem Weg also sicher nicht möglich. Hieraus folgt: Die Frage des Modulationsverfahrens ist für den Richtfunk im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Frequenzbedarfs und im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des apparativen Aufwandes von eminenter Bedeutung. Will man also über digitalen Richtfunk sprechen, so muss man über digitale Modulationsverfahren sprechen. Hierzu ist zunächst einmal wichtig zu wissen, welche besonderen Eigenschaften ein zur Uebertragung bestimmtes digitales Signal überhaupt hat.

Bei der Uebertragung analoger Signale kommt es bekanntlich auf die exakte Einhaltung der Schwingungsform an, weil die Schwingungsform die Nachricht ist. Jede Änderung dieser Form ist grundsätzlich eine Störung, und zwar deshalb, weil der Nachrichtenempfänger im voraus praktisch nichts über die ankommende Nachricht weiss, er kann also selbst zur Richtigkeit der von ihm zu empfangenden Nachricht garnichts beitragen. Seine einzige Aufgabe besteht darin, die Signale möglichst wenig zu verfälschen. Im Digitalfall ist dies völlig anders. Hier sind im einfachsten Fall

I-4

Binärzeichen zu übertragen, deren nachrichtentechnisches Äquivalent nichts weiter als zwei alternativ zu übertragende Amplitudenstufen sind. Im Digitalfall weiss der Empfänger also fast alles schon im voraus über die von ihm zu empfangende Nachricht. Man braucht ihm jeweils nur das Vorzeichen der Binärsymbole zu sagen und schon kann er das Signal perfekt regenerieren.

Störend ist hierbei nur, dass das Binärsymbol nicht bandbegrenzt ist. Begrenzt man es aber in der Frequenz, so wird das ursprünglich endlich lange Binärsymbol im Zeitbereich unendlich lang (Fig. 2). Da es aber in der Übertragungstechnik nie ohne Bandbegrenzung geht, wird man mit zeitlich langen Impulsen leben müssen, und das heisst, dass sich immer Nachbarsymbole -d.h. also die nächstfolgenden mit den vorhergehenden Symbolen- überlappen. Es kommt grundsätzlich zu Intersymbol-Interferenzen (ISI).

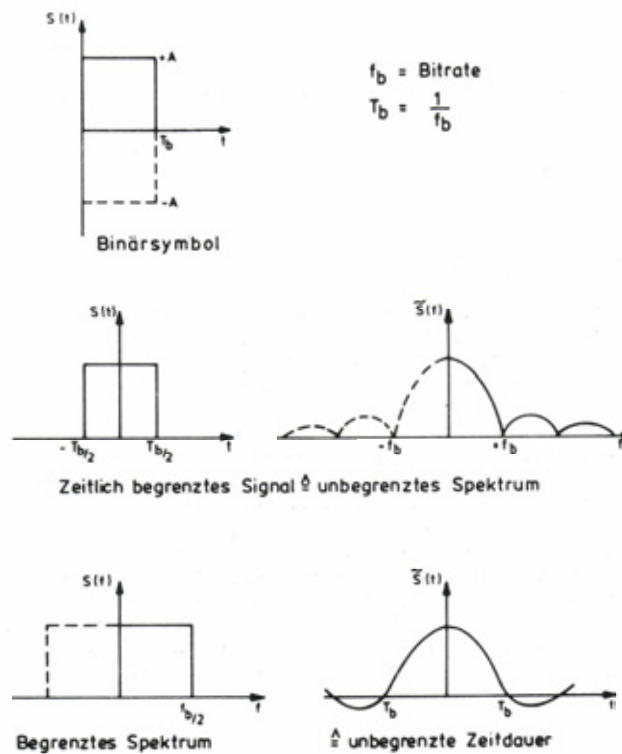


Fig. 2 Binärsymbole im Zeit- und Frequenzbereich

Da man streng genommen bei der digitalen Signalübertragung nur das Vorzeichen benötigt -alles andere ist dem Empfänger wie gesagt schon vorher bekannt- kann man einen Trick anwenden, um trotz ISI einen störungsfreien Abtastbetrieb zu erreichen: Man formt die Impulsfunktion so, dass bei den Maxima der Nachbarimpulse der Hauptimpuls einen Nulldurchgang aufweist. Es ist dann nämlich die 1. Nyquist-Bedingung erfüllt. Praktisch bedeutet dies, dass der Symmetriepunkt des Filters bei derjenigen Bandbreite liegt, die numerisch gleich der halben Bitrate ist (Fig. 3).

Es gibt hierbei allerdings noch eine Komplikation: Reale Nyquist-Filter haben keine unendliche Flankensteilheit. Ein Kompromiss wird meist so gestaltet, dass man dem Filter eine Cosinusflanke gibt. Dieser Kompromiss kostet allerdings wieder etwas Bandbreite, denn bei dem in Fig. 3 gezeigten Cosinus-roll-off von $\sqrt{2}$ ist etwa die 1,5-fache Bandbreite gegenüber einer idealen Nyquist-Filterung erforderlich.

I-5

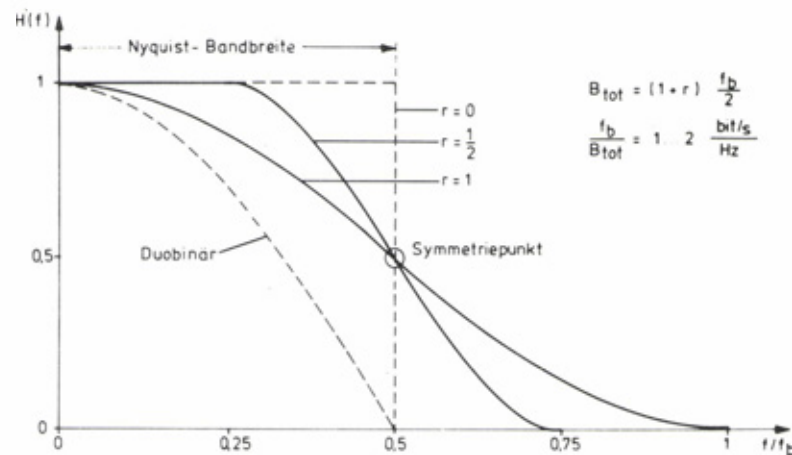


Fig. 3 1. Nyquist-Bedingung und Cosinus-roll-off Filterfunktionen

Eine andere Idee mit dem Ziel einer möglichst bandsparenden Uebertragung ist die, von vornherein eine bestimmte Intersymbol-Interferenz zuzulassen und dafür einen Freiheitsgrad bezüglich der Spektrumsform zu gewinnen. Dieses Prinzip nennt man "Partial-Response-Codierung". Es ist im einfachsten Fall ein duobinäres, also dreistufiges Verfahren, und führt, wie an Fig. 3 verdeutlicht real zu einer Basisbandbreite von $f_b/2$. Hiermit sind also 2 Bit/s/Hz übertragbar.

Ein drittes Stichwort im Zusammenhang mit Modulationsverfahren sei noch erwähnt: Man verzichtet bewusst auf eine ISI-Kontrolle im Sender und beschneidet einfach die Uebertragungsbreite. Es entsteht dann natürlich eine starke Intersymbol-Interferenz, die man im Empfänger durch Transversal-Filter und/oder quantisierte Rückkoppelung beseitigen muss. In diesem Fall wird dann der apparative Aufwand in den Empfänger verlegt. Mit diesem Verfahren haben wir uns bislang nicht beschäftigt, es könnte sein, dass der Aufwand zur Beseitigung der ISI grösser ist als der Aufwand, diese Störungen am Ort der Entstehung zu vermeiden. Es ist aber bekannt, dass z.B. die Britische Post diesen Weg beschreiten will, und man wird sicher zu gegebener Zeit über die Ergebnisse hören.

Ziehen wir jetzt eine Zwischenbilanz: Wir haben festgestellt, dass die Einführung der digitalen Signalübertragung zunächst zu einer ausserordentlich grossen Bandbreite führt, die im Richtfunk sicher nicht zur Verfügung steht. Ferner wurde gesagt, dass durch Umcodierung der binären Bitströme in mehr Stufen die Bandbreiteneffizienz gesteigert werden kann, dass diesem Weg aber Grenzen gesetzt sind. Ausserdem wurde erwähnt, dass die ideale Nyquist-Filterung wünschenswert wäre, diese aber nur unter dem Kompromiss einer endlichen Flankensteilheit machbar ist, was wieder zu Lasten der Bandbreiteneffizienz geht. Was ist also tatsächlich erreichbar und wie ist der heutige Stand der Technik, oder anders gefragt: Wie moduliert man digitale Signale auf einen RF-Träger?

Das einfachste und am meisten angewandte Verfahren ist die Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM, Fig. 4). Hierbei wird der ankommende Binärstrom auf zwei parallele Ströme halber Bitrate aufgeteilt und per Amplitudenmodulation auf Sinus und Cosinus derselben Trägerwelle moduliert. Macht man dies mit zwei 2-stufigen Basisbandsignalen, so führt dies in der Phasenebene zu einem Vektordiagramm mit 4 Phasenzuständen. 4-stufige QAM ist also identisch mit 4-stufiger PSK (Fig. 5).

I-6

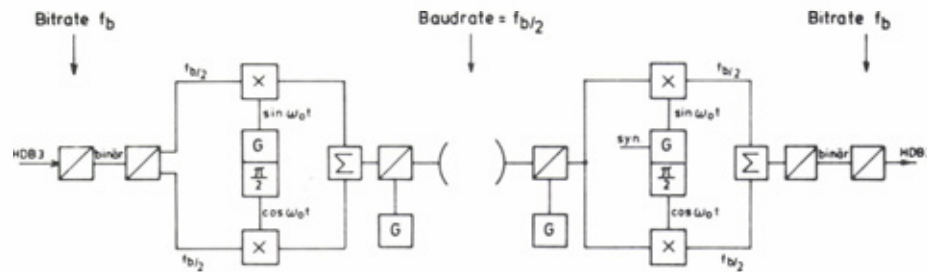


Fig. 4 Prinzip der Quadratur-Amplitudenmodulation

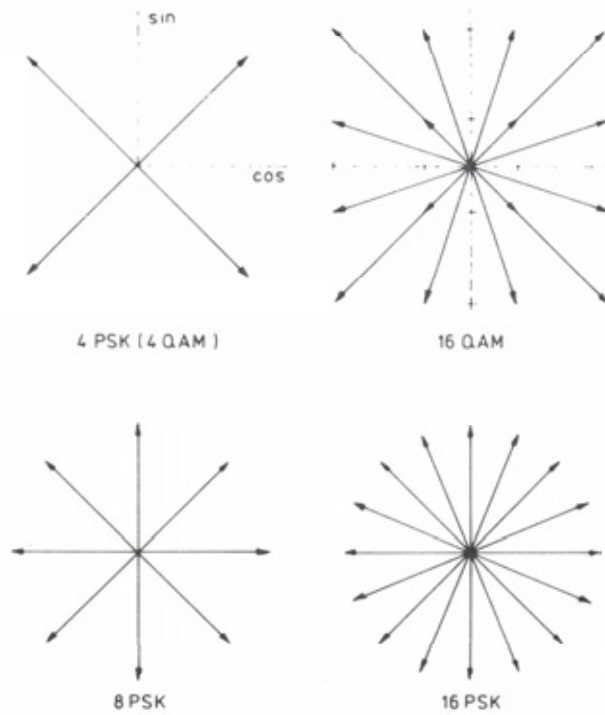


Fig. 5 Zustandsvektoren von QAM und PSK

Führt man das gleiche mit zwei 4-stufigen Basisbandsignalen durch, so erhält man $4 \times 4 = 16$ Zustände des modulierten Signales, und das ist dann die sogenannte 16-stufige Quadratur-Amplituden-Modulation, kurz 16 QAM genannt. Hier ist zu beachten, dass 16 QAM nicht gleich 16 PSK ist, wie man an Fig. 5 sieht. Bei 16 PSK liegen die Enden aller Zeiger auf einem Kreis, was bedeutet, dass das Auswert-

1-7

kriterium für den Empfänger ausschliesslich die Phasenlage ist. Bei 16 QAM ist der Phasenwinkelunterschied zwischen zwei Zeigern grösser als bei 16 PSK, dafür wird zusätzlich eine zweite Amplitudeninformation benötigt. Vorteil dieses Verfahrens, welches gegenwärtig zur Anwendung in Breitband-Richtfunkanlagen mit 140 Mbit/s geplant ist, ist eine günstigere Fehlerrate, weil für die Phasenwinkel grössere Entscheidungsbereiche vorliegen. Nachteilig ist die Amplitudenmodulation und damit eine gewisse Empfindlichkeit gegenüber nichtlinearen Amplitudenverzerrungen und vor allem gegen AM/PM-Konversion.

Modulationsverfahren	3FSK	4PSK 4QAM	8PSK	16PSK	16QAM
Anzahl der Trägerzustände	3	4	8	16	16
Bit je Symbol $\frac{\text{Bitrate}}{\text{Baudrate}}$	1,6	2	3	4	4
Bandausnutzung bit/s/Hz ideal real	1,6 1,1	2 1,3	3 2,1	4 3,0	4 3,0
Geräuschabstand in dB ideal bei BER 10^{-3}	12,1	10,3	15,4	21,0	17,0
Typische Degradation realer Systeme dB	1	2	3	4	4

Fig. 6 Kenngrössen einiger Modulationsverfahren

In Fig. 6 werden zusammenfassend die wichtigsten Kenngrössen der genannten digitalen Modulationsverfahren aufgezeigt: Mit steigender Stufenzahl der Modulation steigt die Bandbreiten-Effizienz, ausgedrückt als Bandnutzung in bit/s/Hz, entsprechend dem 2er Logarithmus an; die nichtideale Nyquist-Filterung setzt den tatsächlichen Gewinn jedoch wieder auf die in Fig. 6 angegebenen Werte herunter. In der 5. Zeile von Fig. 6 ist der notwendige Träger/Geräuschabstand aufgeschrieben. Es ist evident, dass der Leistungsbedarf mit der Stufenzahl des Modulationsverfahrens ansteigt, denn es muss ja stets für den Empfänger die Voraussetzung geschaffen werden, dass die gesendeten Zeichen unterschieden werden können. Bemerkenswert ist der geringe Unterschied im Träger/Geräuschverhältnis zwischen 8 PSK und 16 QAM (1,6 dB), bzw. der Gewinn bei Anwendung von 16 QAM anstelle von 16 PSK. Erkauft wird dieser Vorteil allerdings, wie schon erwähnt, durch höheren Aufwand bezüglich des Linearitätsverhaltens im System.

Man mag nun die Frage stellen, warum Fig. 6 mit 16 QAM aufhört, obwohl doch eingangs gesagt wurde, wie ideal der Weg höherstufiger Verfahren im Sinne der Bandbreiten-Nutzung ist. Zur Erklärung ist die unterste Zeile von Fig. 6 nützlich. Man sieht nämlich, dass zu dem in der 5. Zeile genannten rechnerischen Geräuschabstand noch ein Abschlag für weitere "Nichtidealitäten" zu machen ist, weil in realen Richtfunksystemen die RF- und ZF-Filter Toleranzen aufweisen, weil man den Modulationsgeräten ebenfalls kleine Abweichungen vom Idealfall zugestehen muss, und weil vor allem mit Nachbar- oder Gleichkanalstörungen zu rechnen ist. Denn eine einzelne RF-Strecke ist praktisch nie allein in Betrieb, es werden ganze Netze mit Parallelstrecken, Abzweigen und Kreuzungen aufgebaut. Diese hierfür angesetzte "Degradation" -d.h. der Zusatz-Leistungsbedarf bei vorgegebener Fehler-rate in dB- steigt mit zunehmender Komplexität der Systeme an und korrigiert den Vorteil höherstufiger Systeme wieder nach unten.

Bei 32 QAM haben wir einen erforderlichen Geräuschabstand von 19,9 dB, müssen aber eine Degradation von etwa 5 dB beachten. Bei sonst gleichen Voraussetzungen wäre für 32 QAM eine um den Faktor 2 höhere Sendeleistung erforderlich, und dem steht ein Gewinn in der Bandausnutzung von 3,0 auf vielleicht 3,8 bit/s/Hz gegenüber. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit auch im apparativen Aufwand erscheint die Anwendung von 32 QAM gegenwärtig nicht sinnvoll, zumal man mit einer Bandausnutzung von 3,0 bit/s/Hz bereits recht nahe an die Bandbreiteneffizienz der FM-Systeme herankommt.

I-8

RF-System	Modulation	Raster/MHz	$\frac{\text{SK}}{\text{RF-Kanal}}$	$\frac{\text{kHz}}{\text{Duplex-SK}}$
FM300/2200	FM	14	300	111
FM960/4000	FM	29	960	69
FM1800/6200	FM	29,65	1800	35
FM2700/6700	FM	40	2700	31
DRS2x8/15000	4PSK	14	240	63
DRS34/1900	Offset-4-PSK	28	480	69
DRS140/4000	16QAM	40	1920	52

Fig. 7 Bandbreiteneffizienz, Systemvergleich

Dies wird in Fig. 7 gezeigt. In den sogenannten Schmalbandsystemen (bis 300 Sprechkanäle) wird bei FM-Geräten ohnehin eine sehr geringe Bandausnutzung erzielt, und diese Bandausnutzung wird bereits mit dem PSK-Schmalbandsystem DRS 2x8/15 000 mit 4-stufiger PSK-Modulation weit übertroffen. Das 140 Mbit/s-System zur Übertragung von 1'920 Sprechkanälen kann direkt mit den analogen 1'800-Kanalsystemen verglichen werden, und es ergibt sich eine Bandausnutzung von 26 kHz/SK beim Simplexbetrieb und 52 kHz/SK im Duplexverkehr.

3. DAS VERHALTEN DES FUNKFELDES

Bei den Erläuterungen zu der Bandbreiten-Nutzung haben wir bisher immer von Geräten gesprochen, gewissermassen also so getan, als wäre die richtige Funktion der Geräte das allein Entscheidende. Eine solche Betrachtung ist für den Richtfunk nicht ausreichend. Das Verhalten des Funkfeldes zwischen Sender und Empfänger ist zusätzlich von Bedeutung. Von analogen FM-Systemen weiss man, dass sie relativ unempfindlich gegen Amplitudenverzerrungen sind und dass Schwunderscheinungen in der Regel während der Fadings den Charakter des vom System bestimmten Amplituden- und Laufzeit-Verhaltens nicht wesentlich ändern.

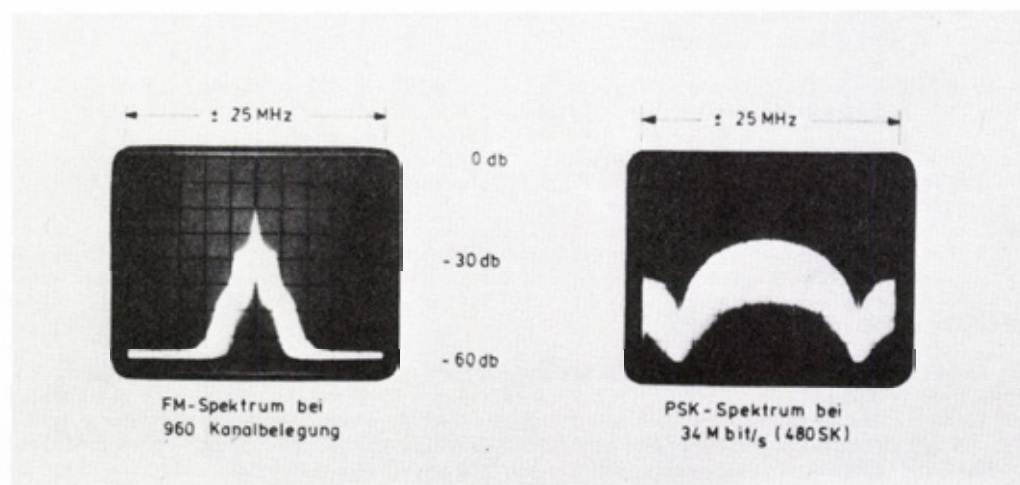


Fig. 8 Vergleich FM- und PCM-Spektrum

I-9

Die Frage ist, ob für digitale RF-Strecken ein anderes Verhalten zu erwarten ist. Dies ist in der Tat der Fall, denn betrachtet man in Fig. 8 vergleichend die Spektralverteilung eines analogen 960-Kanal-FM-Systems mit einem digitalen 480-Kanal-PSK-System (34 Mbit/s), so erkennt man die starke Konzentration der Signalenergie in Trägernähe beim Analogsignal im Gegensatz zum weit gespreizten langsam abklingenden Spektrum des Digitalsignals. Zunächst folgt hieraus, dass der Parallelbetrieb von analogen und hartgetasteten digitalen RF-Strecken tunlichst zu vermeiden ist, weil die PSK-Strecken wegen dieses breiten Spektrums sicherlich FM-Strecken stark stören würden. Ein solcher Betrieb ist deshalb zumindest langfristig auch nicht vorgesehen, vielmehr wird man ein bestimmtes für die RF-Uebertragung vorgesehenes Frequenzband entweder nur mit analogen oder mit digitalen Systemen belegen.

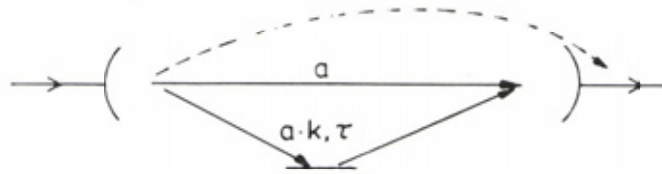


Fig. 9 Zur Mehrwege-Ausbreitung

Das weitgespreizte PSK-Spektrum führt aber noch zu einer weiteren Konsequenz. Nehmen wir einmal an, am Empfangsort würde nicht nur das erwünschte Direktsignal auftreten, sondern ausserdem ein Umwegsignal (Fig. 9), welches durch Reflexion oder Beugung im Funkfeld entstanden ist. Man versteht sofort, dass dieses Umwegsignal am Ort des Empfängers eine andere Phasenlage als das Hauptsignal aufweist und demzufolge zu einer Störung führen muss. Setzt man die Entstehung solcher Umwegsignale grundsätzlich als möglich voraus, so ergibt sich die Frage, warum das gerade bei digitaler RF-Uebertragung auftreten soll und nicht oder nicht so stark bei FM-Uebertragung? Selbstverständlich ist das Ausbreitungsverhalten einer elektromagnetischen Welle vom Modulationsverfahren unabhängig, und insoweit ist die Mehrwegeausbreitung auch bei FM aufgetreten und von dort her durchaus bekannt. Entscheidend ist nur die Frage, welche Wirkung das Störsignal bei gleicher physikalischer Ursache hat.

Im ersten Teil des Vortrags wurde gesagt, dass das im Frequenzbereich begrenzte digitale Signal durch die unvermeidbare Filterung zu einem im Zeitbereich unbegrenzten Signal umgeformt wird und zur ISI führt. Haben wir ursprünglich das System so geplant, dass die Wirkung der ISI dadurch vermindert wird, dass die Nulldurchgänge der Nachbar-Impulse in die Maxima der Signalfunktion fallen, so ist verständlich, dass dieses "Prinzip" nachhaltig durch die Mehrwegeausbreitung gestört wird, weil eben die Störimpulse nicht mehr ihre Nulldurchgänge an der geplanten Stelle haben. Dabei kann sich diese Störung "selektiv" auswirken, denn die Störsignale verhalten sich sowohl hinsichtlich ihrer Signalstärke als auch hinsichtlich ihrer Phasenlage statistisch und führen in Abhängigkeit von der Zeit zu praktisch keinen oder zu scharfen Dämpfungs- und/oder Laufzeitpitzen innerhalb des Frequenzbandes und selbstverständlich zu allen Zwischenzuständen. Bei FM-Uebertragung ist diese -grundsätzlich ebenfalls auftretende- Erscheinung wesentlich weniger kritisch, weil das Signalspektrum, auch bei nominell vergleichbarer Bandbreite in einem viel engeren Bereich um den RF-Träger konzentriert und damit unempfindlich gegen Amplitudenverzerrungen ist.

Das Mehrwege-Modell zeigt anschaulich auch noch, dass diese selektiven Fadings umso stärker auftreten, je länger das Funkfeld ist. Des weiteren folgt aus dieser Ueberlegung, dass bei ausgeprägtem selektivem Fading eine Erhöhung der allgemeinen Schwundreserve kein geeignetes Mittel zur Erhöhung der System-Zuverlässigkeit darstellt. Statt dessen werden bei den Digitalsystemen höherer Bitrate (ab 34 Mbit/s) adaptive Entzerrer eingesetzt, die im einfachsten Fall zumindest die Amplituden-Schräglage automatisch ausgleichen.

I-10

4. VORTEILE DER DIGITALEN RICHTFUNKUEBERTRAGUNG

In den bisherigen Betrachtungen wurde eigentlich nur von Erschwernissen gesprochen, die dem Richtfunk mit der digitalen Uebertragungsaufgabe entstehen. Es ist deshalb notwendig, nun auch noch die Vorteile zu nennen. Ueber die allgemeinen Gründe für die Einführung digitaler Fernmeldenetze wurde an vielen Stellen schon gesprochen und die Gründe gelten zweifellos auch für das Uebertragungsmittel "Richtfunk". Hierüber braucht hier also nicht mehr gesprochen werden. Wohl aber muss erwähnt werden, dass gerade die Einführung digitaler Netze dem Richtfunk die Möglichkeit gibt, neue, sehr hohe Frequenzbereiche zu erschliessen.

Dies hat seinen Grund in der bekannten Tatsache, dass digitale Signale regeneriert werden können. Die Uebertragungsqualität hängt daher praktisch nicht mehr -wie bei der Uebertragung analoger Signale- von der Zahl der Funkfelder ab.

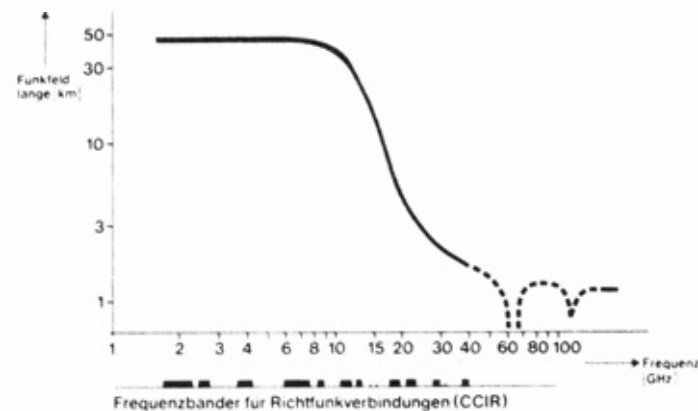


Fig. 10 Funkfeldlängen von Richtfunkstrecken

Bei Frequenzen oberhalb 12 GHz steigt die Regendämpfung an. Die deshalb erzwungenermassen notwendige Verkürzung der Funkfelder führt zu einer dementsprechend grösseren Anzahl hintereinandergeschalteter Geräte (Funkfelder, Fig. 10), um die gleiche Streckenlänge zu erzielen, und dies würde bei analoger Uebertragung zu einer unzulässig hohen Geräuschkumulation führen. Bei digitalem Richtfunk entfällt diese grundsätzliche Problematik durch die Regenerierbarkeit der übertragenen Signale.

Des weiteren sind für den Einsatz digitaler RF-Geräte wirtschaftliche Ueberlegungen von Bedeutung, die dazu geführt haben, dass die Deutsche Bundespost z.B. Richtfunkgeräte im 15 GHz-Band in Verbindung mit preisgünstiger PCM-Multiplextechnik bereits in diesem Jahr in grossem Umfang im regionalen Fernmeldenetz zum Einsatz bringt.

5. ZIVILE RICHTFUNKGERÄTE

Anhand einiger Bilder soll nun unser Stand der Technik kurz aufgezeigt werden: Die Geräte der Bezeichnung DRS 2x8/15 000 (Fig. 11, 12) übertragen im Frequenzbereich um 15 GHz zwei plesiochrone Bitströme von je 8,448 Mbit/s. Die Modulationsart ist 4-Phasentastung. Die Bilder zeigen den einfachen Aufbau mit Antennen von 60 cm ϕ (Fig. 13) oder auch den direkten Aufbau in einem Wetterschutzgehäuse im Freien (Fig. 14), ebenso ist natürlich ein Kabinenaufbau einschliesslich entsprechender TF- und FUE-Geräte möglich (Fig. 15)

I - II

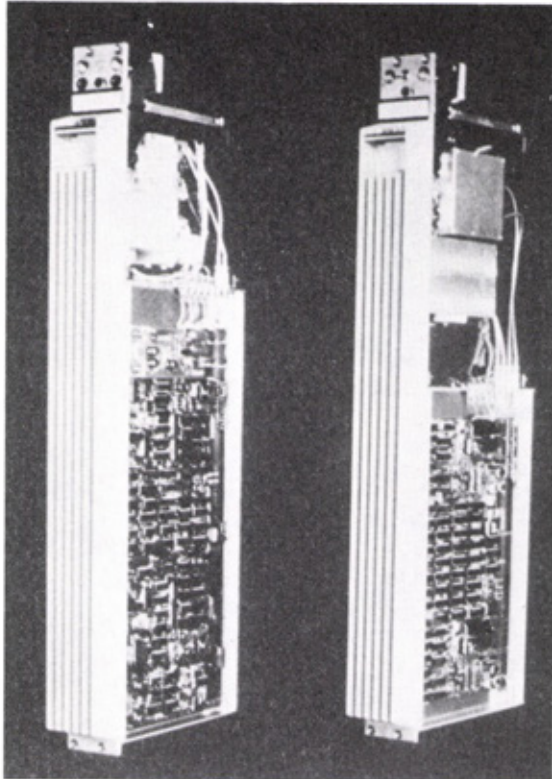


Fig. 11 Sende-Empfangseinheiten des DRS 2x8/15 000

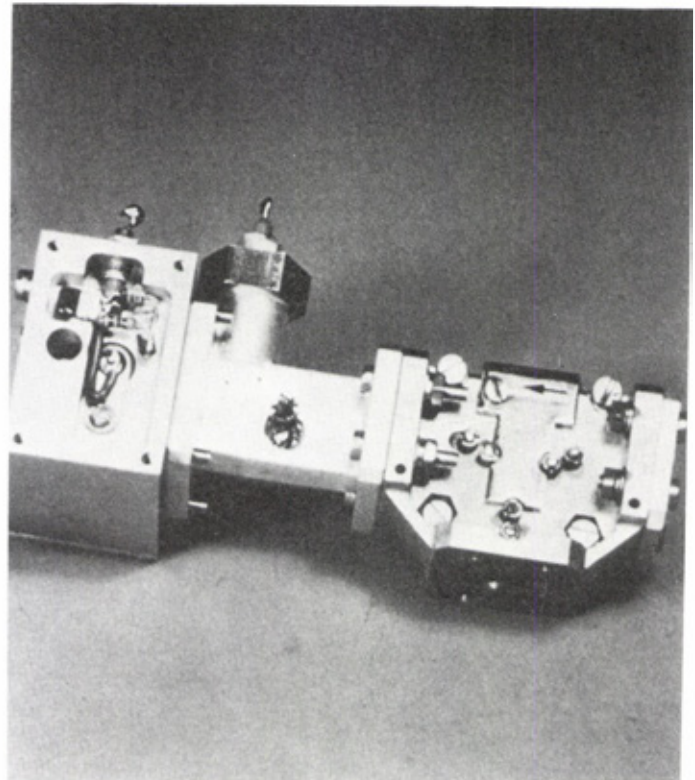


Fig. 12 Empfangsoszillator DRS 2x8/15 000



Fig. 13 DRS 2x8/15 000, Ortsamt Buchenberg der Richtfunkstrecke Kempten-Wiggensbach-Buchenberg

I-12

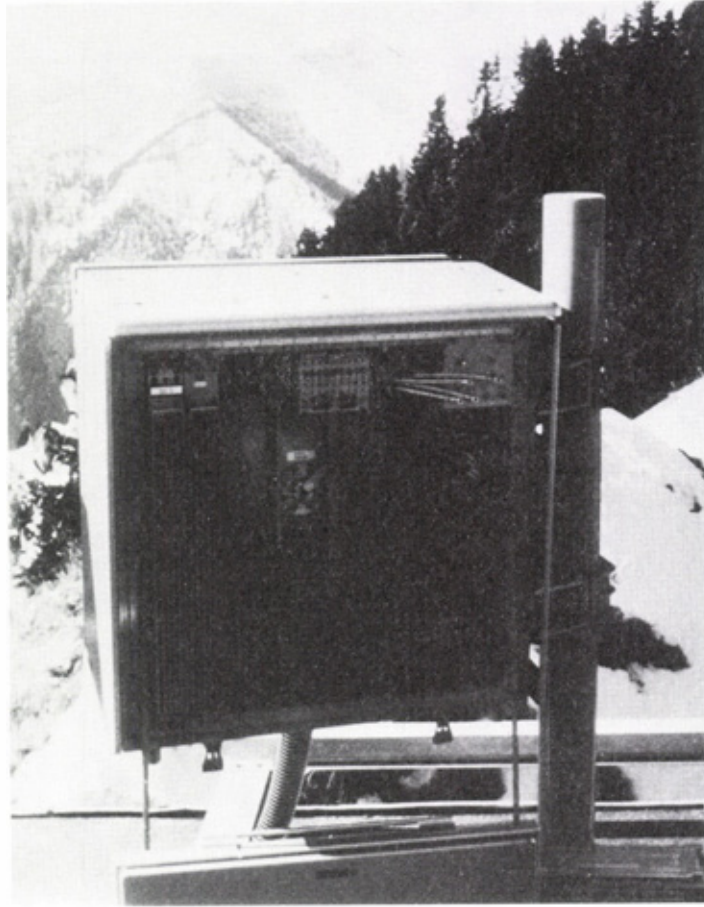


Fig. 14 DRS 2x8/15 000 im Wetterschutzgehäuse (geöffnet)
Aufbau am Laberhorn, Richtung Zugspitze

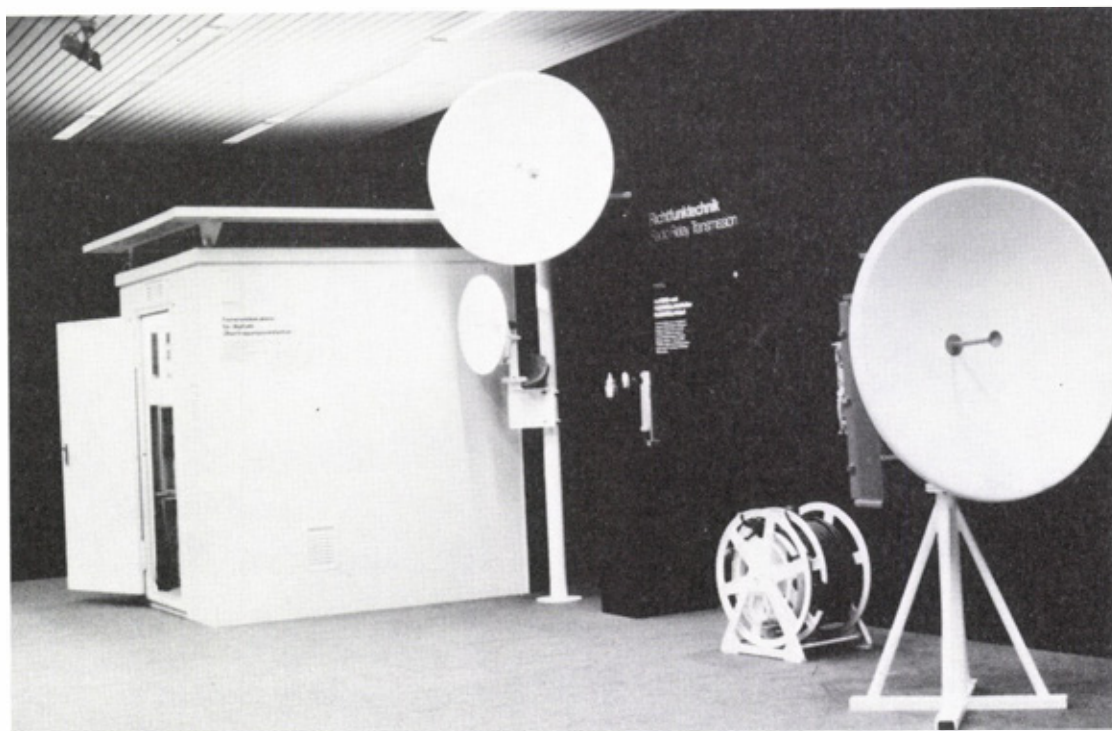


Fig. 15 Funkkabine für DRS 2x8/15 000, TF und FUE

1-13

In gleicher Weise sind Daten-Einfügsgeräte verfügbar, die dazu dienen, über analoge 1'800-Kanal-Richtfunkanlagen oder TV-Strecken zusätzlich zu dieser Breitband-Uebertragung einen Bitstrom von 2 Mbit/s zu übertragen, systemgerecht dazu sind Tonkanal-Multiplexer greifbar, die 5 hochwertige 15 kHz-Tonprogramme zu einem Bitstrom von 2 Mbit/s zusammenfassen.

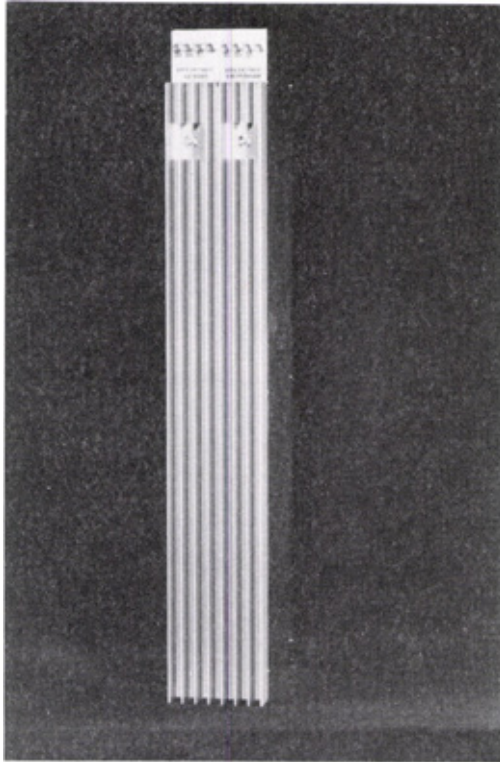


Fig. 16 DRS 34/1 900

Das letzte Bild in dieser Reihe zeigt ein Gerät der nächsthöheren Hierarchiestufe, die DRS 34/1 900 für die Uebertragung von 34 Mbit/s im 1,9 Ghz-Bereich, die bereits typengeprüft ist und sich derzeit bei der Deutschen Bundespost in der Erprobung befindet. Die Arbeiten an 140 Mbit/s-Systemen sind im vollem Gange, allerdings sind hierfür noch keine demonstrierbaren Geräte vorhanden.

6. MILITAERISCHE RICHTFUNKGERAETE

Die bisher betrachteten Frequenzbereiche, Uebertragungsbiraten und auch die gezeigten Bilder bezogen sich alle auf Richtfunksysteme für den zivilen -d.h. derzeit hauptsächlich auf den postalischen- Einsatzbereich. Die Anwendung digitaler Richtfunksysteme im militärischen Bereich wurde bis jetzt mit keinem Wort erwähnt, obwohl gerade die Militärs sagen werden, dass sie die digitale RF-Uebertragung schon seit vielen Jahren praktizieren. Dies ist richtig; doch kam man für den militärisch-taktischen Einsatz auf einem völlig andern Weg von der analogen zu digitalen Signalübertragung, und somit waren auch die Lösungswege anders.

Hierzu wäre vorab die Frage zu beantworten, was eigentlich die Gründe sind für die Einführung digitaler Uebertragungstechnik. Der erste Teil des Vortrages hat wohl gezeigt, dass der Richtfunk selbst wohl kaum die treibende Kraft gewesen sein kann, z.B. in postalischen Breitband-Richtfunknetzen die analoge Uebertragungsart zu verlassen, hat der Richtfunk mit diesem Schritt doch erhebliche Probleme zu bewältigen -es sei nur an die Stichworte "Bandbreiten-Economie" und "Mehrwege-Ausbreitung" erinnert, ganz abgesehen davon, dass der Richtfunk eine Uebertragungsaufgabe zu lösen hat, auf deren Entstehung er keinen Einfluss hat.

Auslöser für den Schritt zur digitalen Uebertragungstechnik ist im zivilen Fernmeldesektor die Vermittlungstechnik, in der in der Tat erhebliche Einsparungen liegen, und die zusätzlich völlig neue Möglichkeiten der Dienstleistungen in fernmeldetechnischen Sinne bieten kann.

I-14

Ganz anders im militärischen Bereich. Hier stand die Notwendigkeit der Verschlüsselung im Vordergrund, eine Forderung, die wiederum im postalischen Bereich ohne Bedeutung ist. Neben der sehr kostspieligen Einzelkanal-Verschlüsselung kam nur die Bündelverschlüsselung als wirtschaftlich tragbare Lösung in Betracht, und dies setzt die Digitalisierung der zu übertragenden Nachrichten voraus. Allerdings musste in einer längeren Uebergangsphase mit der Koexistenz digitaler und analoger Netzkomponenten gerechnet werden und so ergaben sich zwei wesentliche Forderungen für den militärisch-taktischen Bereich: Im Hinblick auf die Flexibilität im Einsatz waren wahlweise analoge oder digital aufbereitete Signale zu übertragen und im Hinblick auf die Koexistenz in analogen Netzen waren Modulationsverfahren mit besonders engem bzw. schnell abklingendem Spektrum notwendig.

Auf das unterschiedliche Spektralverhalten frequenzmodulierter und digital getasteter Richtfunkanlagen wurde bereits im Zusammenhang mit dem Funkfeldverhalten von RF-Strecken hingewiesen und gesagt, dass man im postalischen Bereich den Parallel-Betrieb analoger und digitaler Anlagen vermeidet. Im militärisch-taktischen Bereich ist diese Vorgabe nicht so ohne weiteres realisierbar, weil sich meist unterschiedliche Waffengattungen die Frequenzen teilen müssen, und so muss in diesem Fall eben dem Spektrum eine hohe Priorität eingeräumt werden.

Das Problem ist nicht ganz so gross, wie es zunächst zu sein scheint. Wir müssen jetzt das Modulationsverfahren betrachten, welches vorhin bei der Betrachtung postalischer (Breitband-) Systeme nur kurz erwähnt wurde, nämlich die Partial Response-Codierung. Hierbei wird anstelle der Phase die Frequenz des Trägers getastet, und zwar in drei verschiedenen unterscheidbaren Stufen, nämlich $-1,0$ und $+1,0$, wobei $+1$ der logischen 1 entspricht, -1 der logischen Null und 0 entweder eine logische 1, wenn diese auf 0 folgt, oder 0 nach einer logischen 1.

Das klingt zwar kompliziert, wird aber sendeseitig durch eine einfache, aber kräftige Bandbegrenzung der digitalen Signale vor der Modulation erreicht. Was herauskommt ist eine 3-stufige Frequenzastung, die man duobinäre, biternäre oder richtiger 3 FSK nennt. Auf der Empfangsseite muss natürlich die digitale Auswertung zwischen den drei Amplitudenstufen unterschieden werden können. Damit ist der Aufwand bei biternärer FSK etwas höher als bei PSK-Verfahren gleicher Stufenzahl. Wegen der Doppelaufgabe, digitale und analoge Signale wahlweise übertragen zu können, muss jedoch der FM-Modulator ohnehin vorhanden sein, so dass die Umschaltung oder Umstellung von der einen auf die andere Betriebsart dann mit wenig Aufwand verbunden ist.

Neben dem günstigen Spektrumsverhalten hat die FSK noch einen für militärischen Einsatz bedeutsamen Vorteil: Man hat mit der Wahl des Frequenzhubes einen Freiheitsgrad gegen ECM-Störungen, man kann sich leicht vorstellen, dass bei grösserem Hub und entsprechend verringerter Belegung durch die Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses, am Demodulator gezielte Störer unwirksamer sind. Dies geht natürlich nur bis zu einem gewissen Grad und zu Lasten der übertragbaren bzw. auswertbaren Bitrate. Eine planmässige, stufenweise Verringerung der übertragbaren PCM-Kanäle muss daher mit einer gestuften Prioritätsvorgabe für die bevorrechtigten Kanäle einhergehen.

Die geschilderte ECCM-Massnahme nützt allerdings nichts gegen Dauerstörer, weil diese bei gleicher ZF-Bandbreite das Träger-Rauschverhältnis unabhängig von der Belegung verschlechtern. Gegen Rausch- und Breitbandstörer können nur solche Massnahmen wirksam werden, die den Träger-Geräuschabstand wieder herstellen, also z.B. durch Erhöhung der Sendeleistung und/oder Ausblenden des Störers durch hohe Antennenrichtwirkung, gegebenenfalls Antennen-Nullsteuerung.

Grundsätzlich besteht bezüglich ECCM-Massnahmen kein Unterschied zwischen Analog- und Digital-Systemen. Graduell allerdings sind digitale Systeme gegen die meisten Störarten unempfindlicher, weil sie bis zu einem Störpegel von -20 dB_r ihre volle Uebertragungsqualität behalten.

Eine wesentlich Ausnahme ist allerdings zu machen: Durch Störung des Taktes selbst kann ein digitales System aus der Synchronisierung geworfen werden. Hierzu genügt ein sehr kurzer Burst. Bringt man diesen asynchron zum Takt bzw. zur Rahmeninformation ein, so kann die Rahmen-Erkennung völlig ausgesetzt werden. Man spricht dann von "intelligenten" Störern, weil diese Störart erst nach Analyse des zu störenden Gerätes gezielt eingesetzt wird und deshalb auch die geringste Eigenbedrohung verursacht. Grundsätzlich gilt deshalb für taktische RF-Netze, dass sie mit möglichst hoher Antennenentkopplung gegen denkbare Störer als Planungsziel aufgebaut und im übrigen stets nur mit der geringsten erforderlichen Sendeleistung betrieben werden sollten.

In Fig. 6 ist zu sehen, dass die duobinäre FSK nur die halbe Nyquist-Bandbreite benötigt und damit also (theoretisch) $1,6$ Bit/s/Hz über Richtfunk übertragbar sind. Im übrigen sprechen wir in diesem Zusammenhang von vergleichsweise recht kleinen Uebertragungskapazitäten, nämlich von 24 oder 30 Sprechkanälen, entsprechend $1'152$ kbit/s bei 24 PCM-Kanälen zu je 48 kbit/s (NATO) bzw. $1'024$ kbit/s bei 30 Kanälen mit 32 kbit/s Delta-Modulation (EUROCOM) (Fig. 17,18).

I-15



Fig. 17 Richtfunksystem FM 15 000; Antenne mit RF-Einheit auf 20 m-Stativ, Systemgruppe, Bedienteil rechts

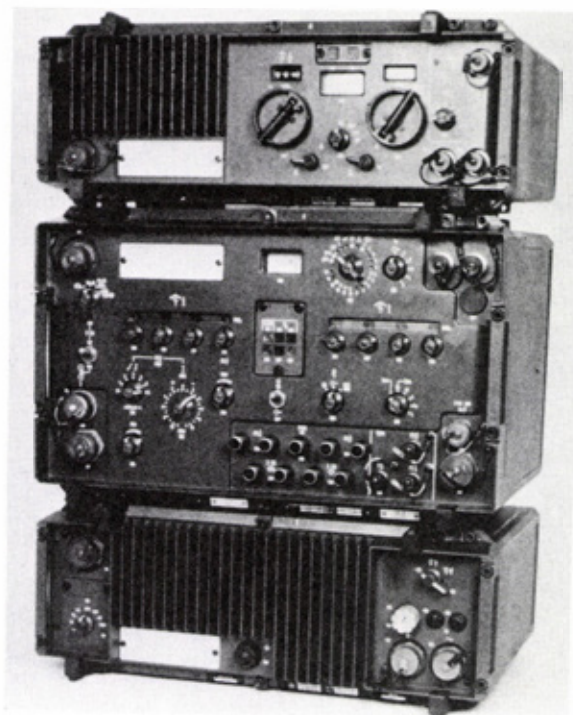


Fig. 18 Richtfunksystem FM 200; von oben nach unten: RF-Einheit, Systemeinrichtung, Stromversorgung

I-16

Für den Nachbarkanalbetrieb ergibt sich hieraus einschliesslich der Degradation ein Frequenzraster von 0,5 MHz und das bedeutet einen Bandbreitenbedarf von rund 84 kHz/Duplexkanal und das ist für ein Schmalband-System eine durchaus akzeptable Grösse. Man muss allerdings erwähnen, dass bei der biternären FSK eine merklich höhere Geräuschabstandsforderung besteht als bei 2 FSK oder 4 PSK (vgl. Fig. 6)

System	Modulation	Kapazität RF-Kanal	Raster MHz	$\frac{\text{kHz}}{\text{Duplex-SK}}$	Bandausnutzung kbit/s/Hz
FM 12/800	FM oder 3 FSK	24 SK oder 1024/1152 kbit/s	0,5	84	1,15
FM 200					
FM 1000					
FM 15000			1,0	166	0,58
CTM 5000			3,5	58	1,21

Fig. 19 Kenngrössen einiger mobiler taktischer Richtfunksysteme

Abschliessend soll noch, wie bei den zivilen Systemen, eine kurze Uebersicht über die Kenngrössen der militärischen Systeme gezeigt werden. Man sieht, dass die taktischen Geräte durchweg mit binärer oder duobinärer Modulation arbeiten und mehrere einstellbare Uebertragungsbitraten aufweisen. Wie oben schon erwähnt, erfolgt die Ansteuerung mit 32 kbit/s bzw. mit 48 kbit/s pro Sprechkanal. Die Militärs geben sich also im taktischen Bereich mit einer niedrigeren Uebertragungsqualität zufrieden.

Dies muss allerdings nicht notwendigerweise für Infrastrukturnetze gelten. Geht man einmal davon aus, dass solche Netze grössere Ausdehnung haben und als übergeordnetes Führungsinstrument eine höhere Uebertragungskapazität bieten müssen, so kommt man mit dieser Uebertragungsaufgabe der im postalischen Bereich schon näher. Das ist besonders dann der Fall, wenn jeder Sprechkanal mit 64 kbit/s codiert wird. Eine solche Absicht ist dann sinnvoll, wenn neben den höheren Qualitätsanforderungen die Möglichkeit eingeplant wird, im Bedarfsfall militärische Leitungen über öffentliche Netze schalten zu können.

Während es schon seit vielen Jahren eine 120-Kanalanlage im 5 GHz-Bereich gibt, die ganz üblichen CCI-Weitverkehrsbedingungen im militärischen Einsatz entspricht, kommt man bei einer neuen Generation zu einer Uebertragungsbitrate von 8,448 Mbit/s. Ein Beispiel dieser neuen Generation ist das System CTM 5000.

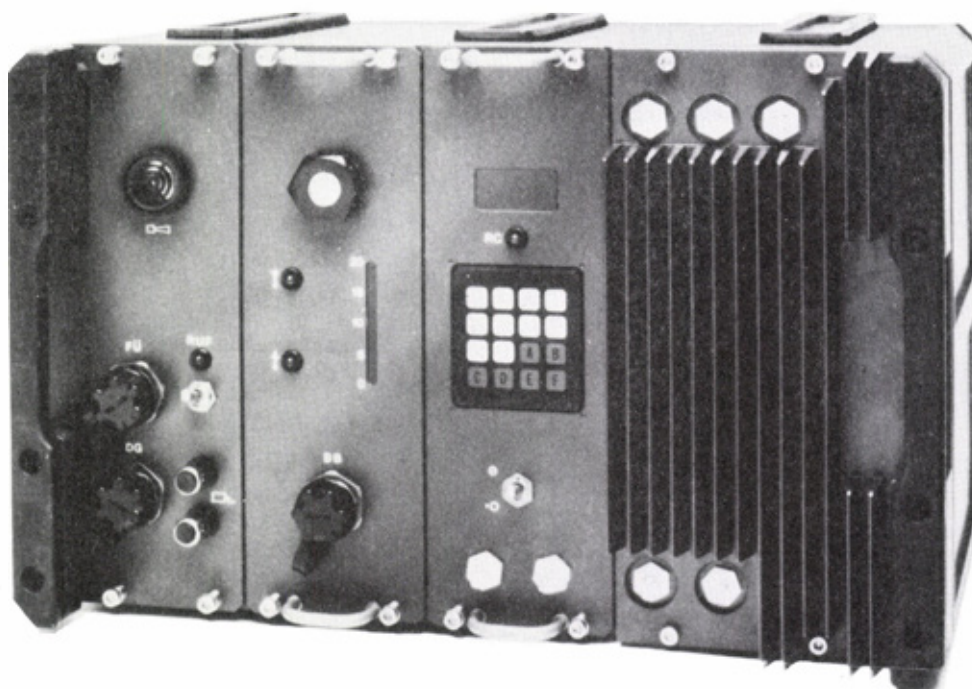


Fig. 20 System CTM 5000

I-17

Da auch im 5 GHz-Bereich noch lange mit analogen "Funkteilnehmern" zu rechnen ist, wird auch in diesem System 3-stufige FSK angewandt und damit kann man das bisher für FM-Systeme angewandte Frequenzraster mit 7/3,5 MHz beibehalten und im 3,5 MHz Abstand Nachbarkanalbetrieb einplanen, allerdings unter Ausnutzung beider Antennen-Polarisationsebenen.

Ein Infrastrukturnetz dieser Art wird also im Betrieb schon manche Eigenschaften aufweisen, die denen kommerzieller Netze ähnlich sind und dies ist schon bei der Planung entsprechend zu berücksichtigen. Man darf allerdings abschliessend beruhigend sagen, dass Mehrwege-Ausbreitung und Selektivschwund bei einer Bitrate von 8 Mbit/s bei richtiger Planung nicht auftreten und somit adaptive Entzerrer oder Diversity-Anlagen nicht eingeplant werden müssen.