Messung der Ausbreitung von Spread-Spectrum-Signalen in der Schweiz

Autor(en): **Schweizer, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 17

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905007

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Messung der Ausbreitung von Spread-Spectrum-Signalen in der Schweiz

J. Schweizer

623.6(494):621.396;

Der Überbelegung von Frequenzbändern sowie gezielten Massnahmen im Rahmen der elektronischen Kriegführung kann mittels extrem bandspreizender Modulationsverfahren (Spread-Spectrum-Technik) begegnet werden. Einer kurzen Einführung in diese Technik folgt die Beschreibung von Feldmessungen mit konventionellen FM-Systemen und Spread-Spectrum-Systemen. Den Abschluss bildet eine Gegenüberstellung der Ergebnisse und eine Diskussion der Leistungsmerkmale, wie Verbindungssicherheit und Sprachverständlichkeit.

La densité des communications dans les bandes de fréquences allouées et les moyens de contremesures peuvent être aujourd'hui contrés dans le cadre de la guerre électronique par un procédé de modulation à étalement du spectre. Après une brève introduction à cette technique, on décrit des mesures réalisées en campagne avec des systèmes classiques en modulation de fréquence et des systèmes à étalement du spectre. Les résultats sont comparés et les caractéristiques d'efficacité tels que sécurité de transmission et compréhension du message sont discutés.

1. Einführung

Schnelle und zuverlässige Übermittlung ist für den taktischen Kommandanten einer modernen, mobilen Armee ein unerlässliches Führungsmittel. Dank ihrer hohen Flexibilität erfüllt insbesondere die drahtlose Übermittlung die gestellten Anforderungen. Gerade die diese auszeichnenden Eigenschaften machen sie aber auch verletzlich gegenüber beabsichtigten oder unbeabsichtigten Störungen. Die Leistungsfähigkeit eines Funksystems wird im wesentlichen durch folgende Effekte vermindert:

- Ausbreitungsdämpfung durch Atmosphäre und Bodenbeschaffenheit (Abschattung, Reflexionen, Mehrwegempfang usw.)
- Nachbarkanalstörungen durch den Betrieb benachbarter Funkstationen; massierter Betrieb von Funkstationen auf engem Raum (Co-channel und Co-location Interference)
- Man-made Noise (Industriestörungen, Zündfunkenstörungen)
- Massnahmen der Elektronischen Kriegführung (Störsender)

Elektronische Kriegführung wird seit vielen Jahren angewendet. Sie war früher eine teure und komplizierte Aufgabe. Besonders die vielen manuellen Funktionen wirkten behindernd und führten meistens zu nur geringen Erfolgen. Damals lag der Vorteil offensichtlich beim Funkpionier.

Mit dem technologischen Fortschritt änderte sich die Situation jedoch grundlegend. Die Entwicklung auf den Gebieten der Mikroelektronik und der Digitaltechnik sowie die Verwendung von Mikroprozessoren öffneten der Elektronischen Kriegführung völlig neue Wege. Heutige Funksysteme sehen sich hauptsächlich folgenden Bedrohungen gegenübergestellt:

- Interzeption: Ein nichtautorisierter Empfänger kann die Übertragung detektieren und Informationen daraus entnehmen
- Peilung: Mit Hilfe einer Kette von Peilern kann der Gegner den Ort der Emission bestimmen und Gegenmassnahmen ergreifen
- Störung: Der Gegner kann die Arbeitsfrequenzen mit Störsignalen belegen und so eine Emission unterbinden

In den letzten Jahren wurden Automaten mit sehr kleinen Akquisitionszeiten zur Detektion und Peilung von Emissionen entwickelt, denen auch der beste Funker keine Massnahmen mehr entgegenzustellen vermag. Diese Situation zwingt dazu, nach neuen Lösungen zu suchen. So wurde das Konzept der konventionellen Schmalbandfunkübertragung in einigen Ländern zugunsten der nichtkonventionellen Bandspreizsysteme (Spread-Spectrum Systems) fallengelassen. Entsprechend sind vom Bundesamt für Rüstungstechnik Spread-Spectrum-Funksysteme auf ihre Eignung für schweizerische Verhältnisse untersucht worden. Insbesondere galt es, die Effekte der Ausbreitung auf die neue Modulationsart zu bestimmen.

2. Bandspreizübertragungssysteme

2.1 Geschichtliches

Der Beginn der Bandspreiztechnik (SST) geht auf die vierziger Jahre zurück, als es galt, perfektionierte Systeme für militärische Anwendungen zu entwickeln. Erst vor wenigen Jahren hat die Technologie aber den Stand erreicht, der es möglich macht, Schaltungen und Systeme so klein, zuverlässig und billig herzustellen, dass eine praktische Anwendung ins Auge gefasst werden konnte. Diese Entwicklung wurde durch die grosse Nachfrage nach neuen Kommunikationsmitteln und -systemen verstärkt. Bedingt durch die steigende Anzahl Benützer, wuchs auch das Bedürfnis nach mehr Informationsaustausch. Gerade dies führte aber zur Notwendigkeit des Schutzes gegen Interferenzen und Abhören, und dies nicht nur für militärische, sondern auch für zivile Anwendungen. Als Resultat dieser beiden Hauptforderungen, gekoppelt mit dem Bedürfnis einer verbesserten Übermittlung, tauchten in den letzten Jahren die Breitbandübertragungssysteme auf. Mit fortschreitender Entwicklung erweiterte sich der Anwendungsbereich der SST auf die Distanzmessung und Ortung.

Die wichtigsten Projekte auf militärischem Gebiet sind unter den Akronymen JTIDS, PLRS, SEEK TALK und SINCGARS in den USA, JAGUAR und SCIMITAR in England, SHAMIR in Israel bekannt geworden. Im wesentlichen sind es integrierte Fernmelde- oder taktische Funksysteme.

2.2 Prinzip und Anwendungen der Bandspreizübertragungssysteme

Die Breitbandspreizmodulation ist ein Doppelmodulationsverfahren, bei welchem der Träger nicht nur durch ein Nachrichtensignal, sondern zusätzlich durch eine band-

spreizende Funktion moduliert wird. In der Praxis werden Werte erreicht, die das 1000- bis 10 000fache der ursprünglichen Bandbreite betragen. Aus diesem Grunde spricht man auch von Breitbandübertragungssystemen.

Die hauptsächlichen Anwendungen der SST dienen zur Unterdrückung von Interferenzen, zur Reduktion der Energiedichte sowie zur Messung von Distanz oder Ort. Für die Applikation auf dem Gebiet des taktischen Funks interessiert vor allem die Möglichkeit zur Unterdrückung von Störungen und Interferenzen, die durch folgende Mechanismen verursacht werden können:

- Störungen durch andere Benützer: absichtliches Stören durch gegnerische Störsender oder unbeabsichtigtes Stören durch andere Sender auf dem gleichen Kanal
- Mehrwegempfang: Selbststörung durch Reflexionen verzögerter Eigensignale (Fading)
- atmosphärisches und thermisches Rauschen

Die Reduktion von Interferenzen wird «anti-jamming» (AJ) genannt.

Eine weitere Eigenschaft der SST erlaubt die Reduktion der Energiedichte der zu übermittelnden Signale. Die Gründe dazu mögen folgende sein: Einhaltung von internationalen Vereinbarungen, Herabsetzen der Detektierbarkeit, Schutz gegenüber nicht autorisierten Hörern.

2.3 Grundlagen der Bandspreiztechnik

Die Bandspreizmodulation soll anhand von Figur 1 erläutert werden. Die Multiplikation der beiden unabhängigen Signale (Informations- und Spreizfunktionssignal) erzeugt ein Signal, dessen Spektrum aus der Faltung der Spektren der beiden Signale entsteht. Weil das Informationssignal schmalbandig ist, wird das Produktsignal ein ähnliches Spektrum besitzen wie das der Spreizfunktion.

Im Empfänger (Demodulator) wird das empfangene Signal mit der genau gleichen Spreizfunktion multipliziert. Wenn die Spreizfunktionen im Sender und Empfänger synchronisiert sind, resultiert ein Signal, das dem ursprünglichen Informationssignal entspricht. Zusätzliche harmonische Komponenten, die ausserhalb der Informationsbandbreite liegen, können durch geeignete Filter eliminiert werden.

Treten unerwünschte Signale (Störsignale) in den Empfänger ein, werden diese durch den Demodulationsvorgang genau gleich wie das Informationssignal im Sender gespreizt. Ein Schmalbandsignal wird also auf die Bandbreite W des Spreizsignals verbreitet. Beträgt zum Beispiel seine Leistung J, ergibt sich seine Leistungsdichte N_0 nach der Spreizung:

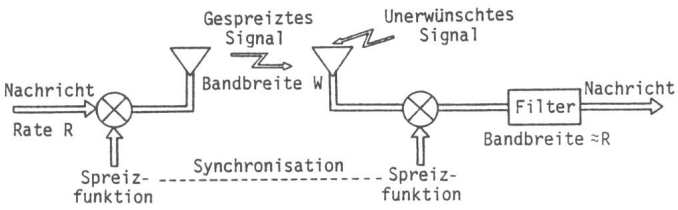


Fig. 1 Prinzip eines SST-Systems

$$N_0 = J/W \qquad [\mathrm{W/Hz}]$$

Weiter habe das Nutzempfangssignal die Leistung S. Bei einer Datenrate von R bit/s beträgt die empfangene Energie pro Bit:

$$E_b = S/R \qquad [\mathrm{W\,s}]$$

In digitalen Kommunikationssystemen wird allgemein die Bitfehlerrate als Funktion des dimensionslosen Quotienten E_b/N_0 angegeben, der für Breitbandsignale die Form

$$E_b/N_0 = S\,W/J\,R$$

annimmt. Nach Umformung des Ausdrucks erhält man für das Verhältnis Stör- zu Nutzleistung:

$$\frac{J}{S} = \frac{W/R}{E_b/N_0}$$

Wenn nun E_b/N_0 das minimale Verhältnis von Bitenergie zu Rauschleistungsdichte darstellt, um eine bestimmte Bitfehlerrate zu erreichen, und weiter W/R das Verhältnis der gespreizten Bandbreite zur ursprünglichen Informationsbandbreite angibt, dann stellt der Quotient J/S das maximal tolerierbare Verhältnis von Störleistung zu Signalleistung dar.

Was die Spreizfunktion betrifft, sind vier verschiedene Spreiztechniken bekannt, wovon hier nur die zwei für die drahtlose Übermittlung wichtigsten aufgeführt werden sollen:

- *Direct Sequence oder Pseudo-Noise Systems* (Phase Hopping, PH). Die Spreizung erfolgt durch Multiplikation mit einer digitalen pseudozufälligen Sequenz, deren Sym-

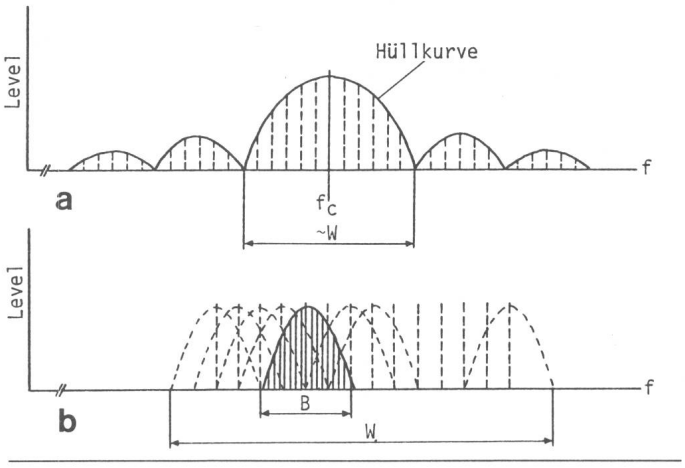


Fig. 2 Leistungsdichtespektrum
a PH-Übertragungssystem
b FH-Übertragungssystem

bolrate ein Mehrfaches der digitalen Informationsrate beträgt

- *Frequency-Hopping Systems* (FH): Die bandspreizende Funktion bewirkt eine pseudozufällige grosshubige Frequenzmodulation des Trägers in diskreten Schritten innerhalb der Spreizbandbreite W

Die zugehörigen Leistungsdichtespektren sind in Figur 2 dargestellt.

3. Wellenausbreitung

3.1 Grundsätzliches

Viele Arbeiten wurden unternommen, um das Verhalten der Ausbreitung von Funkwellen in Abhängigkeit von Frequenz, Distanz, Höhe der Antennen, Geländeformen und Hindernissen, atmosphärischen Bedingungen usw. zu untersuchen. Da für militärische Anwendungen der Benützer zum voraus wissen möchte, ob und in welchem Masse er eine Verbindung in einem bestimmten Geländeabschnitt aufbauen kann, sollte er in der Lage sein, die Ausbreitungsverluste abzuschätzen.

Eine der ersten und zugleich wichtigsten Arbeiten wurde 1957 durch *Egli* [1] für den Frequenzbereich 30–300 MHz publiziert. Er bestimmte die Ausbreitungsverluste über eine grosse Geländevielfalt und versuchte, die Resultate in Abhängigkeit der Geländeformen zu klassieren. Insbesondere wurde für eine bestimmte Übertragungsdistanz die Wahrscheinlichkeit angegeben, für welche die Feldstärke am Empfängerstandort einen gewissen Wert erreicht oder gar überschreitet. Da der Methode von *Egli* einige Unzulänglichkeiten anhaften – insbesondere lieferte sie übermässig pessimistische Resultate –, wurden durch weitere Autoren die Methoden und Modelle immer mehr verfeinert, so dass heute die Abhängigkeit der Ausbreitungsverluste von der Systemwahl, Gerätedimensionierung und der Geländeart und -form recht exakt angegeben werden kann [2, 3].

Für eine gegebene Funkstrecke der Länge D_T berechnet sich die Empfangsleistung zu:

$$R_s = \frac{P_T\, G_{TR}\, G_{RT}\, \lambda^2}{(4\pi)^2\, D_T^2\, L_{TR}}$$

P_T mittlere Sendeleistung
G_{TR} absoluter Leistungsgewinn der Sendeantenne in Richtung zum Empfänger
G_{RT} absoluter Leistungsgewinn der Empfangsantenne in Richtung zum Sender
λ Wellenlänge
L_{TR} Mass für die Abweichung der Ausbreitung gegenüber der Freiraumausbreitung. Für Boden-Luft-Übertragung: $L_{TR} = 1$.

Messungen der Ausbreitungsdämpfung oder der Empfangsleistung für verschiedene Funkstrecken derselben Längen zeigen grosse Abweichungen in den Ergebnissen. Wird dieselbe Strecke über eine längere Zeit ausgemessen, fluktuieren ihre Werte in einem ähnlichen Ausmass.

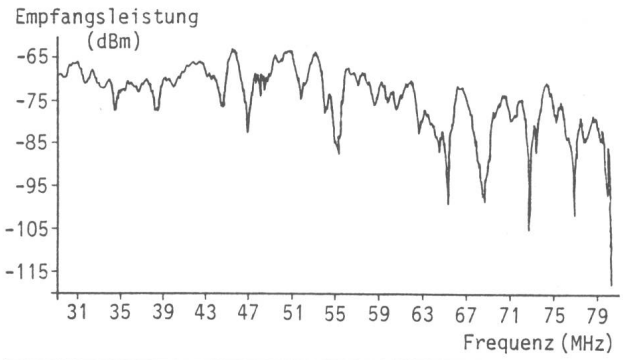


Fig. 3 Schwankungen der Empfangsleistung in Abhängigkeit der Frequenz

Wird die Empfangsleistung in Abhängigkeit des Ortes (mobile Station) oder der Frequenz (Breitbandsysteme) aufgetragen, so zeigt sie die charakteristischen Schwankungen gemäss Figur 3. Anlässlich der 33. STEN hat *Wey* [4] gezeigt, dass die Kurve aus zwei Schwankungsarten zusammengesetzt ist:

- langsame Schwankungen (Grobstruktur): durch dämpfende Wirkung von Geländeunregelmässigkeiten, wie Häuser, Hügel, Wälder usw., verursacht, und
- schnelle Schwankungen (Feinstruktur); schnelle, regelmässige Einbrüche, die durch Bodenreflexionen am umliegenden Gelände entstehen (Mehrwegempfang, Fading).

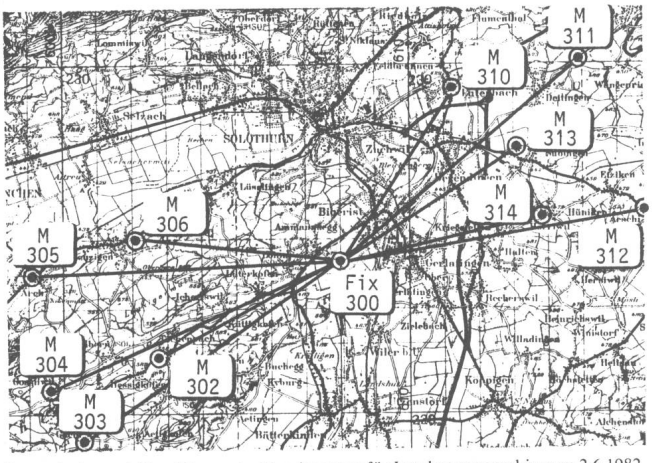
Wie aus Figur 3 hervorgeht, können die Einbrüche in der Empfangsleistung Werte von 30 dB und mehr erreichen. Wird ein Breitbandsystem über diese Funkstrecke betrieben, hat dies zur Folge, dass die Frequenzen, die mit den Fading-Löchern zusammenfallen, keinen Beitrag zur der Übermittlung liefern und somit Fehler verursachen. Lage und Anzahl der Einbrüche variieren mit dem Standort und der Frequenz. Da aber für die Beurteilung eines Funksystems nicht nur die zu erwartenden Werte der Empfangsleistung interessieren, sondern auch die Auswirkungen der Einbrüche auf das Nachrichtensignal und die dadurch hervorgerufene Degradation der Verständlichkeit, kommt man nicht um Feldmessungen herum.

3.2 Feldmessungen mit Schmalbandsystemen

Bei der Beurteilung der Güte und Brauchbarkeit neuer Systeme ist es wichtig, nebst den objektiv messbaren Eigenschaften auch das Zusammenwirken von Benützer und System in die Evaluation einzubeziehen.

Seit einigen Jahren werden bei der Gruppe für Rüstungsdienste Reichweitenmessungen mit verschiedenen Systemen durchgeführt. Zu diesem Zwecke wurden im schweizerischen Mittelland – dem Referenzgelände – statistisch Meßstrecken der Längen 6, 9 und 12 km ausgesucht, über die jeweils die Empfangsleistung und die erzielbare Sprachqualität sowie die Verbindungssicherheit bestimmt wurden. Figur 4 zeigt den Meßstandort «Ammannsegg» mit je fünf Funkstrecken von 6 und 9 km Länge.

Die früheren Messungen mit Schmalbandsystemen erfolgten für verschiedene Frequenzen auf Strecken gleicher



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 2.6.1982

Fig. 4 Situationsplan der Reichweitenmessungen

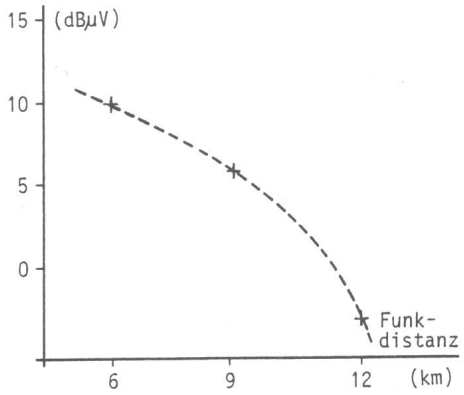


Fig. 6 Medianwerte der Empfangsleistung in Abhängigkeit der Funkdistanz (P_T = 4 W)

Länge, die, wie in Figur 5 dargestellt, zu einer Stichprobe zusammengefasst werden. Die aus den verschiedenen Stichproben ermittelten Medianwerte der Empfangsleistung lassen sich weiter in Funktion der Funkstrecke auftragen (Fig. 6). Aus dieser Figur lässt sich ableiten, dass bei einer Verdoppelung des Abstandes für terrestrische Anwendungen die Empfangsleistung um etwa 12 dB abnimmt.

Gleichzeitig mit der Bestimmung der Empfangsleistung erfolgt diejenige der Übertragungsqualität. Dabei wurden folgende Bewertungskriterien zugrunde gelegt:

Gute Verbindung (G): Verbindungsqualität klar und ohne Geräusch.

Brauchbare Verbindung (B): Verbindungsqualität mit Geräusch; Übermittlung eines unbekannten Textes ohne jede Rückfrage möglich.

Nicht brauchbare Verbindung (N): Verbindungsqualität mit Geräusch; unverständlich oder nur mit Rückfragen verständlich.

Keine Verbindung (K).

Die Ergebnisse der Verständlichkeitstests werden pro Standort tabellarisch aufgetragen (Fig. 7). Anhand der Tabelle lassen sich verschiedene interessante Aspekte veranschaulichen.

Unmittelbar folgt die Korrelation der Frequenzbelegungen für die verschiedenen Standorte. Die Belegung ist in dem Sinne zu verstehen, dass ein Kanal (Frequenz) durch einen Fremdsender (Störer) belegt sein kann oder aber die Senderausgangsleistung nicht ausreicht, um die Funkdistanz zu überbrücken. Beispielsweise befindet sich im Frequenzband 1 auf dem Kanal 03 ein Fremdstörer, der jegliche Verbindungen verunmöglicht. Für den Frequenzbereich 2 hingegen reicht für den Standort 3 die Ausgangsleistung auf den Kanälen 2, 3, 4, 6 und 7 nicht aus.

Wenn ein Funknetz mit den vier Standorten im Frequenzband 2 betrieben werden soll, sieht man ebenfalls aus Figur 7, dass für

- Station 1 die Kanäle 12, 13
- Station 2 der Kanal 0
- Station 3 die Kanäle 2, 3, 4, 6, 7

eine nicht brauchbare Sprachqualität liefern. Von den 16 verfügbaren Kanälen sind deren 8 unbrauchbar; wenn innerhalb dieser 16 Kanäle eine Frequenz willkürlich für die Übermittlung gewählt wird, beträgt die Wahrscheinlichkeit für eine gleichzeitige erfolgreiche Übermittlung an alle vier Stationen *(Verbindungssicherheit)* lediglich 50%.

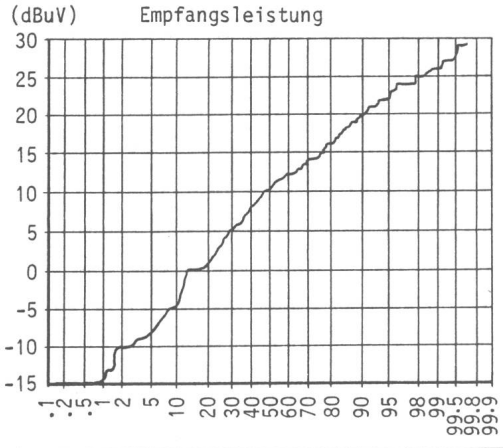


Fig. 5 Summenhäufigkeitsverteilung der Empfangsleistung für D_T = 6 km von etwa 500 Messwerten (P_T = 4 W)

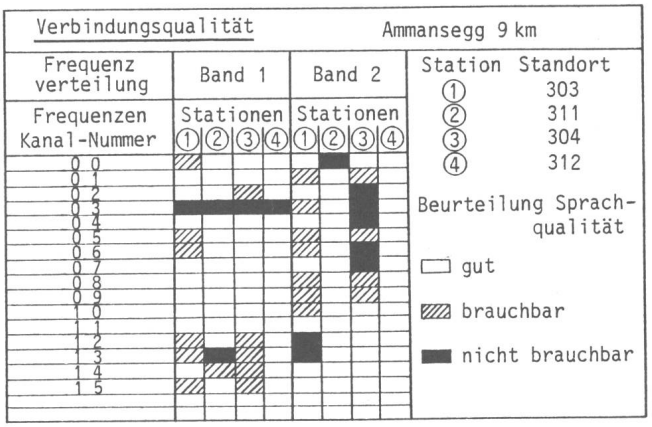


Fig. 7 Verbindungsqualität für den Standort «Ammannsegg» (D_T = 9 km)

Im Hinblick auf die Verwendbarkeit eines Funksystems wird der Bestimmung der Verbindungssicherheit grösste Bedeutung beigemessen. Für die Auswertung gelangt folgende Definition zur Anwendung:

$$\text{Verbindungssicherheit} = \frac{\text{Anzahl Verbindungen «gut» und «brauchbar»}}{\text{totale Anzahl Verbindungen}}$$

Diese Definition kann allgemein angewendet werden; es wird entweder über ein Frequenzband oder aber über viele Strecken mit nur einer Arbeitsfrequenz gemittelt.

3.3 Feldmessungen mit Breitbandsystemen

Im letzten Jahr standen zwei Frequenzhüpfersysteme mit den Charakteristiken der Tabelle I für Prinzipversuche zur Verfügung. Das ursprüngliche Messprogramm sah vor, ähnlich den vorausgegangenen Messungen für jede einzelne Hüpferfrequenz im FM-Betrieb Empfangsleistung und korrespondierende Verbindungsqualität zu registrieren und im Anschluss daran im FH-Mode die Verbindungsqualität und Verbindungssicherheit zu erfassen. Da aber der Zeitbedarf zur Bestimmung der Grössen von 256 einzelnen Frequenzen so gross war, dass die Verhältnisse bei den Messungen im FH-Mode nicht mehr mit den vorangegangenen übereinstimmten, wurde auf diese Erhebung verzichtet, und es wurden als Basis und zu Vergleichszwecken frühere Messungen von Schmalbandsystemen an denselben Standorten herangezogen.

In der Folge wurden Sprachqualität und Verbindungssicherheit in Abhängigkeit der Sendeleistung und Funkstrekke bestimmt. Pro Standort wurden für jede Leistungsstufe (40 W, 4 W und 0,4 W) je 10 Verbindungen aufgenommen. So konnte mit einem Total von 480 Messungen für jede Distanz den Gesetzen der Statistik einigermassen Genüge geleistet werden.

Bedingt durch die Quantisierung ist die Sprachqualität bei digitalen FH-Systemen geringer als bei FM-Systemen, was jedoch nicht heisst, dass die Verständlichkeit ebenfalls geringer sein muss. Nahe der Reichweitengrenze übertrifft die digitale Verständlichkeit sogar diejenige der analogen Systeme, wie dies bereits bei Deltamodulationsmessungen gezeigt worden ist.

Tabelle I

Parameter	System A	System B
Frequenzbereich	30–88 MHz	30–88 MHz
Kanalabstand	25 kHz	25 kHz
Hüpfbandbreite	256 Frequenzen in 6,4 MHz (9 Bänder)	bis 256 Frequenzen im ganzen Frequenzbereich
Hüpfrate	mittel	langsam–mittel
Modulation	digital: 16 kbit/s analog: F 3	digital: 16 kbit/s analog: F 3
Ausgangsleistung	0,01; 4; 40 W	0,4; 4; 40 W
Empfängerempfindlichkeit	-116 dB m	-118 dB m

Gemessene Verbindungssicherheiten

Tabelle II

Distanz	Leistung	System A (Frequenzhüpfer)	System B (Frequenzhüpfer)	Konventionelles FM-System
6 km	40 W	96%	98%	-
	4 W	86%	100%	98%
	0,4 W	-	86%	-
9 km	40 W	96%	98%	-
	4 W	88%	98%	93%
	0,4 W	-	60%	-
12 km	40 W	92%	100%	-
	4 W	73%	80%	82%
	0,4 W	-	33%	-

Die Ergebnisse der Ausbreitungsmessungen für die vier Meßstandorte für Frequenzhüpfersysteme sind in Tabelle II aufgeführt. Zu Vergleichszwecken wurde die Tabelle mit den Werten eines konventionellen frequenzmodulierten Funksystems ergänzt. Die festgestellten Verbindungssicherheiten stimmen bei allen drei Systemen bis auf die statistischen Schwankungen recht gut überein. Dies war bei ungefähr gleichen Systemwerten (Senderausgangsleistung, Empfängerempfindlichkeit, Antennengewinn) auch zu erwarten. Die geringeren Werte für das System A sind auf den kleineren Antennengewinn zurückzuführen.

Besonders interessant ist die Feststellung, dass der Einfluss der Mehrwegausbreitung bei Frequenzhüpfersystemen eine untergeordnete Rolle spielt. Durch die stetige Änderung der Trägerfrequenz entsteht ein Frequenz-Diversity-Effekt. Während bei schmalen Übertragungskanälen die Empfangsleistung zeitweise völlig zusammenbricht, variiert die Übertragungsdämpfung bei Frequenzhüpfern über die ganze Hüpfbandbreite in weiten Grenzen, wobei Einbrüche nur in einem kleinen Teil des Bandbereiches auftreten. Die grossen Dämpfungsunterschiede werden durch den Demodulationsprozess ausgemittelt. Dadurch bleibt die Übertragungsqualität auch über längere Zeiten konstant.

Fehlende Hüpfpulse verleihen der Sprache ein überlagertes Geräusch, das sich wie Rausch-Bursts anhört (Knackgeräusch beim Telefon). Wenn zum Beispiel an der Reichweitengrenze der Anteil gestörter Frequenzen zu hoch wird, sinkt die Sprachverständlichkeit auf nicht akzeptierbare Werte ab.

4. Schlussfolgerungen

Die kurzen Versuche haben die prinzipielle Anwendbarkeit von Spread-Spectrum-Systemen im schweizerischen Gelände bestätigt. Insbesondere zeichnet sich die Frequenzhüpfertechnik durch folgende Eigenschaften aus:

- gute Übertragungseigenschaften, besonders bei Mehrwegempfang
- geringe Störanfälligkeit durch benachbarte Stationen
- geringe Empfindlichkeit gegen gegnerische Störmassnahmen (Störsender)
- Abhörsicherheit durch geringe Leistungsdichte

Die beiden letztgenannten Eigenschaften sind dafür verantwortlich, dass die Frequenzhüpfertechnik für den militärischen Funkverkehr einen hohen Stellenwert geniesst, obwohl gewichtige Nachteile in Kauf genommen werden müssen:

- grosser technischer Aufwand für die Frequenzaufbereitung
- gegenüber Schmalbandsystemen schlechtere Ausnutzung des verfügbaren Spektrums
- Synchronisationsprobleme

Wie jedes neue technologische Gebiet kann die Bandspreiztechnik nicht alle Probleme lösen; sie hat jedoch einen Weg aufgezeigt, der für den taktischen Funk einigen Erfolg verspricht.

Literatur

[1] *J.J. Egli:* Radio Propagation above 40 MHz over Irregular Terrain. Proc IRE, 45(1957)10, p. 1383 . . . 1391.

[2] *K. Bullington:* Radio Propagation for Vehicular Communications. IEEE Trans, VT 26(1977)4, p. 295 . . . 308.

[3] *A. G. Longley* and *P. L. Rice:* Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss over Irregular Terrain. A Computer Method. Environmental Science Administration ERL 79-ITS 67, NTIS AD-676 874, 1968.

[4] *E. Wey:* Wellenausbreitung und Störbeeinflussung beim Mobilfunk. Bull. SEV/VSE 69(1978)16, S. 884 . . . 889.

Adresse des Autors

J. Schweizer Lic. Phys., Bundesamt für Rüstungstechnik, Elektronik und Lenkwaffen, Kasernenstrasse 19, 3013 Bern.