基準信号送信方式を用いた微弱電波 SS 通信による 空きテレビチャンネル帯域の有効利用

正会員 杉 浦 彰 彦[†], 山 下 誠[†], 正会員 稲 津 稔[†]

Vacant TV Channel Reuse by Extremely Low Power SS System using Transmitted Reference Synch

Akihiko Sugiura[†], Makoto Yamashita[†] and Minoru Inatsu[†]

Abstract In this paper, we propose an extremely low-power spread spectrum communication system to be applied to effective use of television channels that uses transmitted reference synch. First, we assumed a cable system such as CATV. Second, we evaluated indoor radio communication. We evaluated extremely low-power spread spectrum communication with an experimental system. The processing gain of about 4 dB was confirmed.

1. ま え が き

近年、高度情報通信化が進む中で、有限な周波数帯域の高能率利用が要求されている。伝送情報の増大に伴い、相互干渉や外来雑音の影響のために良質な伝送路の確保は難しい。このような状況において、耐雑音性に優れ、帯域共用時の相互干渉に強い、スペクトル拡散(SS)通信方式¹⁾²⁾は、帯域の有効利用の手段として有望視されている。

テレビ電波や移動無線電波が混在する VHF 帯の中には、既存電波のレベルの低い複数の周波数束が、ある程度の間隔を空けて存在する。本研究では、このうちのいくつかの周波数帯を用いて、スペクトル拡散した情報信号を微弱電波として挿入し伝送することで、周波数帯域の有効利用を図る。例えばテレビや

CATV のチャンネルのように、地方毎の周波数割当により、空きチャンネルとなっている帯域がある。テレビチャンネル帯域はその公共性の高さから、他の無線通信との帯域共有は行われていない。またチャンネル数の多い一部地域を除いて、通常は 1 チャンネル以上の間隔で放送が行われており、その間の空きチャンネルは、干渉のない数少ない良質な帯域である。本研究では、微弱電波通信を用いて、この帯域の有効利用を検討する。

SS 通信は、情報を広い周波数帯域に拡散するため拡散利得が得られ、妨害電波の影響が少なく、劣悪な実環境下でも利用できることが知られている。また同様に、電力(スペクトル)を拡散して送信するため、最大電力は非常に微弱でも十分に適用でき、法規上許される程度の微弱電波でも実用が可能である³⁾。また同

キーワード: スペクトル拡散, 微弱電波通信, 帯域有効利用, テレビチャンネル, 基準信号送信方式

1996 年 7 月 17 日, 1996 年テレビジョン学会年次大会で発表

1996 年 3 月 25 日受付, 1996 年 5 月 10 日再受付

[†] 豊田工業大学 工学部 制御情報工学科 (〒468 名古屋市天白区久方 2-12-1, TEL 052-802-1111)

[†] Faculty of Engineering, Toyota Technological Institute (2-12-1 Hisakata, Tempaku-ku, Nagoya 468, Japan)

時に、他の既存電波への妨害を極めて少なくすることができ、微弱電波での通信の実現性が高い⁴⁾。さらに符号分割多重を容易に実現し⁵⁾、デジタル信号の多重化を簡略化できるため、情報・制御分野における有効性が高い⁶⁾。本研究では、オフィス、工場、病院などの施設内の、比較的近い範囲内に置かれた情報機器や制御機器間の通信を中心に、微弱電波の適用範囲内での利用を検討する。なお、ここでは無線通信を中心に議論を進めるが、本方式はCATV等の有線帯域の有効利用にも適用できる。

2. 微弱電波 SS 通信

電波法の規制を受けず、また免許の必要ない微弱電波通信の許容値は、3 m の距離における電界強度により規定されている。本研究では VHF のテレビチャンネル帯域(90~222 MHz)を想定しており、この周波数帯域(322 MHz 以下)の電界強度の許容値は 500 μ V/m 以下でなければならない。例えば、 $\lambda/2$ のダイポールアンテナに供給できる電力に換算すると、電界強度の近似式(1)から約-43.4 dBm (4.6×10^{-8} W)であることがわかる。

$$E \approx \frac{\sqrt{P}}{r} \quad (\text{V/m}) \quad (1)$$

ただし、 P :電力 (W)、 r :距離 (m)

また、SS のようにスペクトルが広帯域に及ぶ方式では、単位周波数当たりの電力で規定され、さらに-5 dB の補正值を加える必要があるため、-48.4 dBm/MHz 以下の送信電力でなければならない(条件1)。さらに、最大電力の周波数から 120 kHz 離れた周波数で、最大電力より-3 dB 以内でなければならない(条件2)。実際に本方式を微弱電波通信に適用するためには、この2つの条件を満たす SS 方式を実現する必要がある。

本研究では条件1を満たすために、最大電力がある中心周波数帯域の電力を-48.5 dBm/MHz とした。さらに、テレビチャンネルの帯域幅(6 MHz)を有効に利用するために、拡散帯域幅を 6 MHz (拡散符号速度 3 MHz) とした。また、この拡散帯域幅において前述の条件2を満足するために、符号長 255 ビットの m 系列を拡散符号に適用した。本研究では、拡散符号 1 系列につきデータ 1 bit で直接拡散を行うため、拡散符号速度を符号長で割った値が拡散スペクトルの間隔になる。ここで条件2を満たすためには、中心周波数(最大電力)から 120 kHz 以内に拡散スペクトルが存在しなければならない。つまり、拡散符号速度を符号長で割った値が 120 以下の必要がある。この場

表1 実験装置の諸元
Condition of experiment system.

変 調 方 式	直接拡散方式(BPSK)
拡 散 符 号	255 bit 長 PN 符号(m 系列)
拡 散 符 号 速 度	3 Mb/s
拡 散 帯 域 幅	6 Mb/s
情 報 伝 送 速 度	11.8 kb/s
最 大 電 力	-48.5 dBm/MHz
搬 送 波 周 波 数	173 MHz (4 ch)
基 準 信 号 周 波 数	185 MHz (6 ch)
復 調 方 式	同期検波方式
受信部中間周波数	12.0 MHz

合、符号長が 25 以上であれば良いが、m 系列の符号長は $2^n - 1$ であるので、符号長 31 以上となり、符号長 255 は条件2を十分に満たしている。さらに、直接拡散方式のスペクトルエンベロープは $\text{sinc}(x)^2$ の分布を示すので、中心周波数から $0.6 \times$ 拡散符号速度で電力が半減(-3 dB) することがわかる。ここで条件2を満たすためには、 $0.6 \times$ 拡散符号速度が 120 kHz よりも大きければよい。つまり 200 kHz 以上の拡散符号速度が必要になるが、本方式では 3 MHz の拡散符号を適用するので、明らかに条件2を満たしていることがわかる。また、情報伝送速度は拡散符号速度/符号長により規定され、11.8 kb/s となる。以上により、微弱電波通信の条件を満たすように設定された本方式の諸元を表1に示す。

3. 基準信号送信方式の適用

本研究では、干渉の少ない良質な帯域である、空きテレビチャンネル帯域の有効利用を検討する。名古屋地区のテレビ電波の使用状況を表2に示す。表より、VHF 帯域の 12 チャンネル中、5 チャンネルで放送が行われており、他は空きチャンネルとなっていることがわかる。本研究では、この空きチャンネルの中から、4 チャンネルと 6 チャンネルを用いて、基準信号送信方式の微弱電波 SS 通信を試みる。ここで、搬送波周波数を 4 チャンネル(173 MHz)とし、基準(同期)信号周波数を 6 チャンネル(185 MHz)とした。本研究では同期検波方式を用いており、中間周波数はこの2つのチャンネル周波数の差(12 MHz)とした(表1参照)。

基準信号送信方式の構成を図1に示す。この方式では送信側の基準信号が送信され、そのまま受信側の局部基準信号として利用できるので、同期捕捉・追跡や

符号発生器が必要なく、受信装置の簡略化が実現される。ここで情報変調されたSS信号(4チャンネル)と、中間周波数(f_{IF})だけオフセットした基準SS信号(6チャンネル)とが、同じPN符号系列により拡散され、同時に送出される。受信側ではそれぞれのチャンネルを分離した後に、DBMで乗算することで情報変調された中間周波数信号のみを抽出できる。この信号を、中間周波数帯において通常の復調器で検波すれば、情報復調ができる。

基準信号送信方式(本方式)と、同期搬送波供給方式のスペクトルを図2に示す。基準信号送信方式では、2チャンネル分のSS信号帯域が必要になるが、微弱電波通信においては、空きチャンネルであれば利用できるのでは問題はない。また空きテレビチャンネルは1チャンネル間隔である場合が多いので、2チャンネル

分を容易に確保できる。さらに、同期搬送波供給方式と比べた場合、基準信号送信方式においては同期信号もスペクトル拡散しているため、最大電力が低く抑えられており、微弱電波通信に適していることがわかる。

4. 試作装置による実験結果

本方式の実用性を評価するために、試作装置を用いて妨害余裕度を実験的に求める。試作装置の外観を図3に示す。ここでは、微弱電波の範囲内において単純に比較を行うために、本方式(基準信号送信方式)と同じ実験装置を利用できる同期搬送波供給方式について比較を行った。本方式と同期搬送波供給方式とは、同期信号の拡散が送信側で行われるか受信側で行われるかの違いだけである。そのため、同一実験装置の入れ換えで、それぞれ構成できるので、方式そのものの違いを単純に比較することができる。実験では、誤り率が 10^{-6} 程度(誤り訂正適用範囲)確保される D/U となるまで実験を行う。なおここでは、受信機のチャンネルフィルタ(図1中、RF1)通過後のスペクトル拡散信号の強度と、雑音(妨害)強度の電力比から、次式に

表2 名古屋地区のテレビ電波の使用状況
Condition of TV channel at Nagoya-city.

チャンネル	周波数帯(MHz)	放送局
1	90~96	東海テレビ
2	102~108	
3	108~116	NHK(総合)
4	170~176	
5	176~182	CBC テレビ
6	182~188	
7	188~194	
8	192~198	
9	198~204	NHK(教育)
10	204~210	
11	210~216	名古屋テレビ
12	216~222	

※空欄は未使用(空きチャンネル)

図2 各方式のスペクトル
Spectrum of each method.

図1 基準信号送信方式
Transmitted reference synch method.

図 3 試作装置の外観
Outside view of the experimental system.

図 4 有線系における D/U と誤り率の関係 (白色雑音)
Relationship between the D/U and the error rate in wire communication (white noise).

図 5 有線系における D/U と誤り率の関係 (単一周波数妨害)
Relationship between the D/U and the error rate in wire communication (sinusoidal signal interferences).

図 6 無線系における D/U と誤り率の関係
Relationship between the D/U and the error rate in radio communication.

より D/U を定義した。

$$D/U = 10 \log_{10}(\text{SS 電力} / \text{雑音電力})$$

それぞれの方式において、 D/U と誤り率の関係を比較した結果を以下に示す。

初めに有線系において受信側入力に白色雑音を付加して、 D/U を変化させて実験を行った。微弱電波の範囲内で有線通信を行い、各方式の妨害余裕度を比較した結果を図 4 に示す。図に示す通り、微弱電波の範囲内においては、同期搬送波供給方式と比較した場合で約 4 dB、耐雑音性が向上していることがわかる。

同様に有線系において、単一周波数妨害についても評価を行った。ここでは白色雑音の代わりに、標準信

号発生器から単一周波数信号を加えて実験を行った。なお、単一周波数妨害の周波数は、メインローブ下側スペクトル 255 本中の 100 本目に重なるように調整し、約 172.824 MHz とした。単一周波数の信号強度を増減させ、 D/U を変化させて各方式の妨害余裕度を評価した結果を図 5 に示す。図より、受信側の逆拡散の処理利得により、白色雑音の場合と比較して、約 13 dB 程度の妨害余裕度の向上が確認された。また、同期搬送波供給方式と比較して妨害余裕度が約 6 dB 向上していることがわかる。

次に無線系を用いて、実験室内において微弱電波 SS 通信を評価した結果を図 6 に示す。ここでは白色

図 7 送受信間の距離と D/U の関係
Relationship between the distance and the D/U .

雑音は付加せずに、送受信間の距離を 1.8 m から 3.5 m まで変化させて実験を行った。送受信間の距離に応じて受信側に入力される SS 信号が増減し、空間雑音との電力比で D/U が変化する。なお、単一周波数妨害の実験は電波法で禁止されているため、無線系では行わない。図より、有線系と比べてマルチパス等の影響のため 1 dB ほど妨害余裕度が低下しているが、無線系においてもほぼ同じ誤り率特性の傾向であることがわかる。また、試作装置を用いた場合でも、同期搬送波供給方式で約 -3 dB、本方式で約 -7 dB までの雑音強度であれば、微弱電波 SS 通信が適用可能であることが確認された。なお、実験室内における送受信間の距離と D/U の関係は図 7 に示す通りである。送信側からの近接波の影響で、理論値の傾斜と若干異なっているが、おおむね距離の 2 乗に反比例している。

さらに、ここで用いた無線系の実験装置で、空きテレビチャンネル帯域と、その他の帯域について、妨害信号強度(既存通信)を測定した。ここでは、4 チャンネル帯域(空きチャンネル)、5 チャンネル帯域(放送チャンネル)、通信帯域(143~149 MHz)について、同じ周波数特性をもつ BPF を用いて、実験室内の電界強度を比較した。図 8 に各チャンネルのスペクトルの様子を示す。図より、空きチャンネルでは -90 dBm 程度のスペクトルしか観測されないが、放送チャンネルでは -70~-80 dBm 程度の映像信号が多く観測された。とくに放送チャンネルでは音声信号とサブキャリヤの強度が強く、-50 dBm 程度の妨害となることがわかる。また、4 チャンネル帯域と通信帯域の各 6 MHz について、同様に実験室内の電界強度を比較した結果、通信帯域でも -60~-70 dBm の通信信号が確認された。これらの帯域について、実験室内で観

(a) TV band (4ch)

(b) TV band (5ch)

(c) communication band
(143 - 149 MHz)

図 8 各周波数帯域の電力スペクトル
Spectrum of each frequency band.

測された電界強度と微弱電波の電界強度から D/U を求めると、放送チャンネルでは -10 dB、通信帯域では +3~-10 dB 程度の妨害波に相当した。これらの帯域を用いて微弱電波 SS 通信を行う場合には、この電界強度分の妨害を受けることになる。本方式では、空きテレビチャンネル帯域を利用することで、この電界強度分の妨害を受けずにすむ。また同時に、本方式が他の既存通信に干渉を与えないためにも、空きテレビチャンネル帯域は微弱電波通信に適している。

5. む す び

本研究では、スペクトル拡散した情報信号を、空きテレビチャンネル帯域に微弱電波として挿入することで、周波数帯域の有効利用を試みた。本方式の適用により、おおむね次のことが明らかになった。

- 基準信号送信方式を適用することで、同期信号供給方式と比べて、白色雑音で約 4 dB、単一周波数妨害で約 6 dB、妨害余裕度が向上した。
- 有線系と比べて約 1 dB の性能低下はあるものの、無線系においてもおおむね同等な誤り率特性となった。
- 空きテレビチャンネルを利用することで、他の放送チャンネルや通信チャンネルを用いた場合よりも数十 dBm の妨害を回避することができた。
- 空きテレビチャンネル間隔(12 MHz)に合わせて基準信号送信方式の中間周波数を設定することで、受信装置の簡略化が実現された。
- 試作装置を用いて実験室内において評価した結果、 D/U で約 -7 dB までであれば、微弱電波 SS 通信が十分に適用可能であることが確認された。

今後の課題としては、CDM(符号分割多重)信号の本方式への適用を検討している。

本研究の一部は文部省科学研究費(奨励研究(A))の補助を受けて行われた。ご援助頂いたことを感謝します。

〔参 考 文 献〕

- 1) G. C. Cooper: "Modern Communications Spread Spectrum", McGraw-Hill Book Company (1986)
- 2) R. C. Dixon: "Spread spectrum system", John Wiley and Sons (1976)
- 3) L. B. Milstein: "Interference Rejection Techniques in Spread Spectrum Communication", Proc. IEEE, **76**, 6, pp. 657-671 (June 1988)
- 4) J. W. Ketchum and J. G. Proakis: "Adaptive Algorithms for Estimating and Suppressing Narrow-Band Interference in PN Spread-Spectrum System", IEEE Trans. Comm., **COM-30**, 5, pp. 913-924 (May 1982)
- 5) R. C. Tittsworth: "A Boolean-function-multiplexed telemetry system", IEEE Trans. Space Electron. Telem., **SET-9**, pp. 42-45 (1963)
- 6) 杉浦, 稲津: "スペクトル拡散通信方式による PCM オーディオ信号の伝送", 信学論(A), **J77-A**, 6, pp. 940-941 (1994)
- 7) 杉浦, 稲津: "スペクトル拡散通信における各種妨害の影響", テレビ誌, **47**, 10, pp. 1383-1390 (1993)
- 8) 杉浦, 稲津: "帯域削減スペクトル拡散方式による周波数帯域の有効利用", テレビ誌, **50**, 1, pp. 111-117 (1996)

すぎうら あきひこ
杉浦 彰彦 1990年, 東京農工大学大学院修士課程修了。同年, 豊田工業大学制御情報工学科助手。スペクトル拡散, CDMA方式, 動画像の高効率符号化, 画像応用, 画像計測, デジタル放送方式の研究に従事。正会員。

やました まこと
山下 誠 1996年, 豊田工業大学制御情報工学科卒業。同年, トヨタ自動車(株)入社。在学中, スペクトル拡散通信方式の研究に従事。

いなつ みのる
稲津 稔 1951年, 名古屋大学工学部電気学科卒業。同年, NHKに入局。テレビ信号伝送, VTRの研究・運用に従事。1981年, NHK退職。同年, 日立電子(株)に入社。VTR関係担当。1987年より, 豊田工業大学工学部制御情報工学科教授(伝送・画像担当)。1995年, 退職。工学博士。正会員。