

異なる無線通信システム間信号の電力差計算方法

高橋 賢[†] 田中 公一[†] 藤原 真[†] 八方 直久[†]

[†] 広島市立大学 〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: [†]s.takahashi@m.ieice.org

あらまし 同一周波数で運用される複数無線局からの信号を同時に受信すると干渉が生じる。信号処理によりこのような干渉信号を除去しようとする、所望信号にも影響を与えることがある。所望波と干渉波の両方の確率分布が与えられれば、確率分布の減算表現によりその正しく受信できる確率を表現できると考えられる。ここでは、特性関数法を用いてこの信号差の確率分布を求める。

キーワード 干渉, 信号受信, フェージング, 特性関数法

Calculation method of power difference among different radio communication systems

Satoshi TAKAHASHI[†], Koichi TANAKA[†], Makoto FUJIWARA[†], and Naohisa HAPPO[†]

[†] Hiroshima City University

3-4-1 Ozuka-Higashi, Asa-Minami, Hiroshima 731-3194 Japan

E-mail: [†]s.takahashi@m.ieice.org

Abstract If signals from multiple radio stations operating at the same frequency are simultaneously received, interference occurs. Attempting to remove such an interference signal by signal processing may also affect a desired signal. Given the probability distributions of both the desired wave and the interference wave, it can be considered that the probability of correct reception can be represented by subtraction representation of the probability distribution. Here, the probability distribution of this signal difference is obtained using the characteristic function method.

Key words interference, signal reception, fading, characteristic function method

1. ま え が き

LPWA (low power wide area) などデジタルデータを長距離まで伝送できる移動無線通信技術が普及しつつある。このような移動無線通信は、環境センシングや状態監視などへの適用が見込まれるが、自らがその無線周波数を利用する際に、すでの利用されていないことを確認してから電波を送信するキャリアセンスが行われるのが一般的である。同一周波数の電波を複数の無線局が同時に電波を送信すると、一般にこれらの信号は互いに干渉するためである。

しかしながら、屋外において電波強度は伝搬距離の 3.5 乗程度に反比例して減少するために、同一周波数を利用する無線局の間に一定の利確距離があれば共存できることが知られている。セルラ通信においては、干渉波受信電力に対する希望波受信電力が干渉保護比 (protection ratio) 以上になるように基地局間の離隔距離を確保するのが一般的である。このような考え方は広く知られ、アナログ FM を用いるセルラ通信では、その値として 20 dB 程度が用いられてきた [1]。

FM (frequency modulation) 方式を用いる信号同士では、その信号振幅に情報を保持しないために、その強度の大きな信

号のみが復調される [2]。この捕捉効果のために離隔距離を狭めることができる。デジタル角度変調方式である GMSK (Gaussian minimum frequency shift keying) や PSK (phase shift keying) においても捕捉効果が期待できる [3-6]。日本においては 920 MHz 帯にて運用され、GMSK を用いる Wi-SUN (wireless smart utility network) [7] やチャープ信号を用いる LoRa (long range) [8,9] などは捕捉効果による耐干渉性に優れると考えられる。アナログ FM 波の復調では周波数成分を直接的に抽出するフォスターシーレー型復調器などの回路構成が用いられてきた。それに対して、このようなデジタル変調方式の変復調では、変調指数や正確な搬送波維持のために、直交変調器や同期検波が用いられる [10]。このような復調器は、振幅情報も保持するため、CMA (constant modulus algorithm) などのデジタル信号処理による干渉波除去への可能性を持つ。

デジタル信号処理による干渉波除去や捕捉効果を考える上で、所望波や干渉波の電力分布を仮定した差の電力分布を求めることが重要である。本稿では、和の確率分布を求めるための特性関数法を用いて電力差分布を求める。はじめに、特性関数法の概要について説明する。つぎに、ここで用いる

特性関数法のフーリエ級数化を示し、電力差分布を求める。

2. 特性関数法

特性関数法は、確率変数の和分布を求める一つの方法である。確率変数 $X_1, X_2, \dots$ のそれぞれが確率密度関数 $p_{X1}(\gamma), p_{X2}(\gamma), \dots$ に従うとき、確率変数 $X_1 + X_2 + \dots$ の確率密度関数 $p(\gamma)$ は、

$$p(\gamma) = p_{X1}(\gamma) * p_{X2}(\gamma) * \dots \quad (1)$$

にて表される。ただし、 $*$ はたたみ込み積分

$$p_{X1}(\gamma) * p_{X2}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{X1}(\tau) \cdot p_{X2}(\gamma - \tau) d\tau \quad (2)$$

である。特性関数法は、フーリエ変換がたたみ込み積分を積に変換することを利用して、 $X_1 + X_2 + \dots$ などの確率密度関数を求める方法である。

確率密度関数 $p(\gamma)$ に従う確率変数 X の特性関数 $\Phi(\omega)$ は、指数部に共役をとったフーリエ変換

$$\Phi(\omega) = \langle e^{j\omega X} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} p(\gamma) \exp(j\omega\gamma) d\gamma \quad (3)$$

により定義される [11]。ここで、 ω は補助変数、 $\langle \cdot \rangle$ は集合平均である。特性関数は、その分布に関する全ての情報を含む。例えば、負の指数分布（レイリーパワー分布）

$$p(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) u(\gamma) \quad (4)$$

に対応する特性関数は

$$\Phi(\omega) = (1 - j\omega\bar{\gamma})^{-1} \quad (5)$$

である。このとき、確率密度関数は指数部に共役をとった逆フーリエ変換

$$p(\gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) \exp(-j\omega\gamma) d\omega \quad (6)$$

にて表される。

確率変数 X_1 と X_2 のそれぞれの特性関数が $\Phi_{X1}(\omega)$ と $\Phi_{X2}(\omega)$ のとき、確率変数の差 $X_1 - X_2$ に対応する特性関数もまた

$$\Phi(\omega) = \langle e^{j\omega(X_1 - X_2)} \rangle = \Phi_{X1}(\omega) \cdot \Phi_{X2}(-\omega) \quad (7)$$

から得られる。

3. 特性関数のフーリエ級数化

数値計算を効率よく行うために、特性関数の計算に含まれるフーリエ変換のフーリエ級数化を行う [12]。これは、確率変数の取りうる最大値 R を仮定して、確率密度関数 $p(\gamma)$ に対する特性関数を

$$\begin{aligned} \Phi(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} p(\gamma) \exp(j\omega\gamma) d\gamma \\ &\approx \int_{-R}^R p(\gamma) \exp(j\omega\gamma) d\gamma \end{aligned} \quad (8)$$

に近似する方法である。同様に、式 (6) についてもフーリエ級数により表現すると、この $\Phi(\omega)$ に対する $p(\gamma)$ は、

$$p(\gamma) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_n \exp\left(j\frac{n\pi}{R}\gamma\right) \quad (9)$$

になる。このとき、 $\omega = (n\pi)/R$ である。ここで、 p_n はフーリエ級数に相当する

$$p_n = \frac{1}{2R} \int_{-R}^R p(\gamma) \exp\left(-j\frac{n\pi}{R}\gamma\right) d\gamma \quad (10)$$

である。式 (6) と式 (9) とを比較すると、このフーリエ級数は

$$p_n = \frac{1}{2R} \Phi\left(-\frac{n\pi}{R}\right) \quad (11)$$

と書き直せる。式 (11) を式 (9) に代入すると、 $\Phi(\omega)$ を用いて $p(\gamma)$ を表せる。

$$\begin{aligned} p(\gamma) &= \frac{1}{2R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Phi\left(-\frac{n\pi}{R}\right) \exp\left(j\frac{n\pi}{R}\gamma\right) \\ &= \frac{1}{2R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Phi\left(\frac{n\pi}{R}\right) \exp\left(-j\frac{n\pi}{R}\gamma\right) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $\Phi(\omega)$ を偶関数成分 $\Phi_{\text{even}}(\omega)$ と奇関数成分 $\Phi_{\text{odd}}(\omega)$ とにわけると、 $\Phi(\omega) = \Phi_{\text{even}}(\omega) + \Phi_{\text{odd}}(\omega)$ であり、 $\Phi_{\text{even}}(\omega) = \Phi_{\text{even}}(-\omega)$ また $\Phi_{\text{odd}}(\omega) = -\Phi_{\text{odd}}(-\omega)$ である。式 (12) の右辺が実数となるためには、オイラーの公式から、 $\Phi_{\text{even}}(\omega)$ が実数でなければならず、また、 $\Phi_{\text{odd}}(\omega)$ が純虚数でなければならない。したがって、 $\Phi_{\text{even}}(\omega) = \text{Re}\{\Phi(\omega)\}$ 、また $\Phi_{\text{odd}}(\omega) = j\text{Im}\{\Phi(\omega)\}$ である。このことと、特性関数の性質 $\Phi(0) = 1$ から、式 (12) は次のように書き直せる [13]。

$$\begin{aligned} p(\gamma) &= \frac{1}{2R} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re}\left\{\Phi\left(\frac{n\pi}{R}\right)\right\} \cos\left(\frac{n\pi}{R}\gamma\right) \right. \\ &\quad \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \text{Im}\left\{\Phi\left(\frac{n\pi}{R}\right)\right\} \sin\left(\frac{n\pi}{R}\gamma\right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

式 (13) を γ に対して $-\infty$ から γ まで項別積分すると、その累積分布関数 $P(\gamma)$ を得ることができる。

$$\begin{aligned} P(\gamma) &= \int_0^{\gamma} p(\xi) d\xi \\ &= \frac{\gamma}{2R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \left[\text{Re}\left\{\Phi\left(\frac{n\pi}{R}\right)\right\} \sin\left(\frac{n\pi}{R}\gamma\right) \right. \\ &\quad \left. - \text{Im}\left\{\Phi\left(\frac{n\pi}{R}\right)\right\} \left\{ \cos\left(\frac{n\pi}{R}\gamma\right) - (-1)^n \right\} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

4. ま と め

同一周波数を共有して互いに通信を行う移動無線通信システムにおいて、デジタル信号処理や捕捉効果を考える上で電力差が重要である。ここでは、所望波と干渉波それぞれの確率分布が与えられたときの差分布を求めるために、和の確率分布を求めるための特性関数法を用いた。また、計算機上で効率的にその確率密度関数や分布関数を求めるために、特性関数のフーリエ級数化を行った。

謝辞 本研究の一部は科研費（課題番号 17K06436）および広島市立大学特定研究費（先端学術研究費）により実施した。

文 献

[1] R.C. French, "The effect of fading and shadowing on channel reuse in

- mobile radio,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.VT-28, no.3, pp.171–181, Aug. 1979.
- [2] K. Leentvaar and J. Flint, “The capture effect in FM receivers,” IEEE Transactions on Communications, vol.24, no.5, pp.531–539, May 1976.
- [3] K. Murota and K. Hirade, “GMSK modulation for digital mobile radio telephony,” IEEE Transactions on Communications, vol.29, no.7, pp.1044–1050, July 1981.
- [4] P. Varshney and S. Kumar, “Performance of GMSK in a land mobile radio channel,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.40, no.3, pp.607–614, Aug. 1991.
- [5] G.L. Lui, “Threshold detection performance of GMSK signal with $bt = 0.5$,” Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM 98), pp.515–519, Oct. 1998.
- [6] M.A. Wickert and W.S. Sward, “Limiter discriminator-detected GMSK with FM and GMSK interference in a land mobile channel,” IEEE Transactions on Communications, vol.47, no.11, pp.1693–1700, Nov. 1999.
- [7] K. Mochizuki, K. Obata, K. Mizutani, and H. Harada, “Development and field experiment of wide area Wi-SUN system based on IEEE 802.15.4g,” 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp.76–81, Dec. 2016.
- [8] A. Kadri and R.K. Rao, “Binary chirp signals in *varepsilon* – mixture noise: Coherent and noncoherent detection,” 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, pp.579–582, Aug. 2007.
- [9] L. Vangelista, “Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation,” IEEE Signal Processing Letters, vol.24, no.12, pp.1818–1821, Dec. 2017.
- [10] 鈴木 博, 山尾 泰, “デジタル信号処理によるデジタル fm 直交変調器の設計,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J65-B, no.9, pp.1148–1155, Sept. 1982.
- [11] A. Papoulis, Probability, random variables, and stochastic processes, 3rd. edition, WCB McGraw-Hill, Boston, 1991.
- [12] R. Barakat, “First-order statistics of combined random sinusoidal waves with applications to laser speckle patterns,” Optica Acta, vol.21, no.11, pp.903–921, Nov. 1974.
- [13] S. Takahashi, “A method of cognizing primary and secondary radio signals,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E93-A, no.12, pp.2682–2690, Dec. 2010.