

## PPM-UWB IRのための同期タイミング追跡法の提案

羽瀨 裕真<sup>†</sup> 鎌田 賢<sup>††</sup> 小野 文枝<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 茨城大学工学部 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1

<sup>††</sup> 茨城大学工学部 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1

<sup>†††</sup> 東京理科大学工学部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3

E-mail: <sup>†</sup>habuchi@mx.ibaraki.ac.jp, <sup>††</sup>kamada@cis.ibaraki.ac.jp, <sup>†††</sup>ono@ee.kagu.tus.ac.jp

あらまし 本研究では、インパルスベースのウルトラワイドバンド (Ultra Wide-Band Impulse Radio, UWB-IR) 通信において、受信同期タイミング追跡法を提案している。特に、情報変調法としてパルス位置変調 (Pulse Position Modulation, PPM) 方式を利用した場合の受信同期タイミングを保持する方法について示している。本提案方式は、送信パルスの極性が情報データに応じて変化しないことに着目し、受信信号にスプリットフェイズ型テンプレート信号を同期参照信号として直接乗算することで遅延ロックループと同等の弁別特性を実現する方式である。つまり、従来 PPM の情報復調に利用されているテンプレート信号を単に 1/2 パルス時間だけ時間移動させた信号を同期用参照信号として利用するものである。このとき、同一極性のパルスが隣接すると弁別特性が劣化してしまうため、PPM スロット順に+極性と-極性が交互になるように配置されている。

キーワード 同期タイミング追跡法, ウルトラワイドバンド通信, インパルスラジオ, パルス位置変調, マルチパルス・パルス位置変調, 弁別特性, 遅延ロックループ

## Proposal of a Tracking Method for PPM-UWB IR

Hiromasa HABUCHI<sup>†</sup>, Masaru KAMADA<sup>††</sup>, and Fumie ONO<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Ibaraki University 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

<sup>††</sup> Faculty of Engineering, Ibaraki University 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

<sup>†††</sup> Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

E-mail: <sup>†</sup>habuchi@mx.ibaraki.ac.jp, <sup>††</sup>kamada@cis.ibaraki.ac.jp, <sup>†††</sup>ono@ee.kagu.tus.ac.jp

**Abstract** Ultra wide-band Impulse radio (UWB-IR) has shown the potential for dramatic throughput by using the very narrowband pulses. In this paper, a tracking scheme for UWB-IR is proposed. In particular, establishment of time synchronization of the receiver is revealed for UWB-IR using the pulse position modulation (PPM). The proposed tracking scheme tracks the synchronization timing by using the split-phase typed template signal which consists of two successive pulses of opposite polarity because the polarity of transmitting pulses of PPM does not change according to the information data. Moreover, the polarity of the transmitting PPM-pulse changes according to the slot number: the positive pulse for the odd slot-number and the negative pulse for the even slot-number. The control signal or S-curve is made by multiplying the received signal by the one half chip shifted template signal for information demodulation.

**Key words** Tracking scheme, Ultra wideband communication, Impulse radio, Pulse position modulation, Multi-pulse pulse position modulation, S-curve, Delay locked loop

### 1. ま え が き

最近では、人を中心とし、パーソナルコンピュータやプリンタ、デジタルカメラ、携帯電話などの周辺機器を連携させ

るためのワイヤレスパーソナルエリアネットワーク (Wireless Personal Area Network, WPAN) やワイヤレスボディエリアネットワーク (Wireless Body Area Network, WBAN) が注目されている。この WPAN や WBAN はオフィスに限らず家電

機器が多数存在する家庭においても重要になることが予想される。WPAN や WBAN は人を中心にした比較的小さいエリアのネットワークであり、ユーザ主導型の通信方式が必要不可欠であると考えられる。WPAN や WBAN を支える通信方式には、これまでスペクトル拡散 (Spread-Spectrum, SS) 通信に基礎をおく方式が検討されており、例えば、ZigBee などでも利用されている直接拡散 (Direct-Sequence Spread-Spectrum, DS-SS) 方式や Bluetooth などでも利用されている周波数ホッピング (Frequency Hopping, FH) 方式やウルトラワイドバンド (Ultra-Wideband, UWB) 方式などが検討されている。特に、UWB 通信は 2002 年 2 月の FCC 認可から多くの研究がなされ、IEEE802.15.3a において標準化も進められている。主に、(1) タイムホッピング (Time Hopping, TH) 方式やパルス位置変調 (Pulse Position Modulation, PPM) 方式、コードシフトキーイング (Code Shift Keying, CSK) などの通信方式に関する検討、(2) 遅延ロックループ (Delay Locked Loop, DLL) などの同期法に関する検討、(3) キャリアセンスマルチプルアクセス (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) などの多重アクセス方式に関する検討、(4) 既存システムや現在検討中の新システムとの共生に関する検討、(5) 波形生成法および送受信アンテナに関する検討、(6) 電磁界の人体を含めた自然への影響の検討、などが行われている。また、インパルスベースの UWB(UWB-IR) 通信において、PPM 方式や CSK 方式は多値数を増加することで誤り率特性を改善できる方式であるため魅力的な通信方式ではあるが、高多値数の場合でも同期タイミングを保持できる同期法の確立が必要不可欠となっている。したがって、本稿では、PPM 方式の同期タイミング追跡法に着目する。

これまでに、同期に関する検討としては、(a) スペクトル拡散通信で利用されている遅延ロックループを用いる方式 [2]-[5]、(b) 同期参照信号の利用を工夫した同期ループを用いる方式 [2][3]、(c) 同期専用 (パイロット) 信号を利用する方式 [7][8][12]-[16]、(d) 同期捕捉方式 [6]-[9]、(e) 同期ジッタの性能への影響 [1][10][11]、について検討が行われている。PPM 方式のための同期法としては、まず文献 [1] で PPM の情報復調に利用するテンプレート信号を 1/2 パルス幅だけ時間シフトした信号を同期参照信号として利用する方式を提案している。しかしながら、PPM は情報を 1 フレーム内のスロット位置により表すため、PPM 信号の存在するスロット位置が情報データにより変化してしまい、この方法では適切な弁別特性 (S カーブ) を描くことが困難となってしまふ。つまり、PPM の特徴が考慮されていないと言える。その問題点を解決する方式として、文献 [2] では、1 と 0 を同数とする疑似雑音符号 (PN) 系列を利用して PPM スロットの占有率を同確率にし、適切な弁別特性を描く遅延ロックループを提案している。これらの方法は 2 値 PPM を対象にしたものであり、4 値以上の場合については対処されていない。文献 [7][12] では同期専用信号を用いる方式が提案されており、特に文献 [12] では PPM の情報フレームに同期信号を埋め込む方式を提案している。この方式は同期専用信号は用いるが同期フレームを必要とせず、情報伝送速度を劣化

させることはない。文献 [5] では、PPM の多値数と同数の遅延ロックループを利用するものであり、2 値 PPM と 4 値 PPM を取り上げジッタの影響に付いて検討されている。

本稿では、パルス位置変調 (PPM) 方式およびマルチパルス・パルス位置変調 (MPPM) 方式のための同期タイミング追跡法を提案する。本方式は、PPM 方式および MPPM 方式の送信パルスの極性が情報データに応じて変化しないことに着目し、受信信号にスプリットフェイズ型テンプレート信号 [17]-[19] を同期参照信号として直接乗算することで遅延ロックループと同等の弁別特性を実現する方式である。つまり、文献 [1] と同様に従来 PPM の情報復調に利用されているテンプレート信号を単に 1/2 パルス時間だけ時間移動させた信号を同期参照信号として利用するものである。ここで、(i) PPM 信号または MPPM 信号が存在するスロット位置に依存せずに弁別特性を構成できること、(ii) パルスが隣接することによる弁別特性の劣化を防止できること、(iii) 多値数の増加に対処できること、などを満たす必要がある。本方式では、1 フレームにおいて奇数番目のスロットには + 極性のパルスを、偶数番目のスロットには - 極性のパルスを生起するように配置する。このようにすることで隣接パルスが同極性になることを防止し、常に適切な弁別特性を構成できるものと考えられる。

## 2. パルス位置変調方式とマルチパルス・パルス位置変調方式

### 2.1 パルス位置変調方式

パルス位置変調 (Pulse Position Modulation, PPM) 方式は図 1 に示すように 1 フレーム中のスロット位置により情報を伝送する方式である。そのため、(1) 1 フレームのスロット数を  $N$  とすると単位パルス当たり  $\log_2 N$  ビットの情報量を伝送できるため小電力伝送が実現できる、(2) 1 フレーム当たりのスロット数を増大すると 1 パルス当たりの情報量を増大でき、さらに (3) ビット誤り率特性をシャノンリミットに近付けることができる、特長を有する。

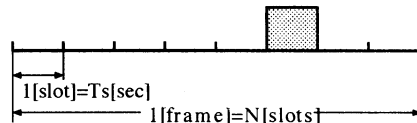


図 1 パルス位置変調方式のフレーム構成

しかしながら、PPM 方式では、多重または多元接続を行うと 1 フレーム中に複数のパルスが存在し、信号識別が困難になってしまうため多重化・多元接続化が困難となる。さらに、フレーム長を長くすることによりビット誤り率特性が改善し、1 パルス当たりの情報量も改善されるものの情報伝送速度は  $(\log_2 N)/NT_s$  [bps] ( $T_s$  はスロット幅) が与えられるため減少してしまう。また、PPM 方式はフレーム中のパルス位置で情報伝送するため、信号が常に同じ位置に存在するわけではなく、受信同期の確立が困難になってしまう。これまで、1 つ目の問題に対して、スペクトル拡散パルス位置変調 (Spread-Spectrum Pulse Position Modulation, SS-PPM) 方式やタイムホッピン

グ型パルス位置変調 (Time Hopping Pulse Position Modulation, TH-PPM) が検討されている。また、2つ目の問題に対してはマルチパルス・パルス位置変調 (Multipulse Pulse Position Modulation, MPPM) 方式やパルス間隔変調 (Pulse Interval Modulation, PIM or Pulse Spacing Modulation, PSM) が検討されている。3つ目の問題に対しては同期専用 (パイロット) 信号を利用する方式がとられている。

### 2.2 マルチパルス・パルス位置変調方式

PPM 方式が1フレーム中に1つのパルスを利用し、そのフレーム中の位置により情報を表現していたのに対して、マルチパルス・パルス位置変調 (Multi-pulse Pulse Position Modulation, MPPM) 方式は1フレーム中に複数のパルスを用い、その複数パルスの位置関係により情報を表現する方法である。図2にMPPM方式のフレーム構成を示す。1フレームが $N$ 個のスロットから構成されているものとする、PPM方式の場合には $\log_2(N)$ [bits/frame]の情報となり、MPPM方式の場合には $M$ 個のパルスを利用するものとする $\log_2(N C_M)$ [bits/frame]となる。そのため、MPPM方式の1フレーム当りの情報量はPPM方式よりも増大できることになる。

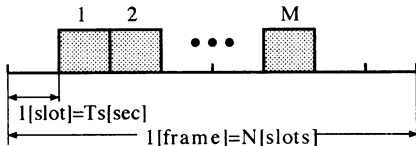


図2 マルチパルス・パルス位置変調方式のフレーム構成

### 3. PPMのための同期タイミング追跡法

遅延ロックループを用いた同期タイミング追跡法では、図3のような弁別特性 (Sカーブ) を利用して同期タイミングの調整を行うものである。

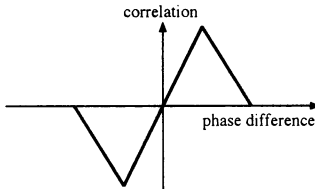


図3 弁別特性 (Sカーブ)

このSカーブをパルス位置変調 (PPM) 信号に対しても構成することを考える。その際、PPMパルスがフレーム中のいずれのスロットに存在するかは情報データにより決定される点に留意し、情報データに依存せずに構成することが望まれる。本同期タイミング追跡法では、PPMフレームに対して、図4のテンプレート信号を直接乗算して相関値を求めることで、図3と同様のSカーブを構成するものである。本同期タイミング追跡法の特徴は以下の通りである。

- (a) 参照信号は1つだけ利用し、それは復調用テンプレート信号を1/2パルス幅遅延させた信号で構成される。
- (b) PPMパルスがいずれのスロットに発生しても同一のSカーブが生成できるように、パルスが発生するスロット

番号が奇数番である場合と偶数番である場合とでは、反対の極性になるよう設定する。例えば、奇数番目の場合は+極性、偶数番目の場合は-極性にする。

- (c) PPMパルスの位置に依存しないので、マルチパルス・パルス位置変調 (MPPM) にも適用できる。
- (d) PPMパルスまたはMPPMパルスが発生していないスロットも相関されているので、雑音成分の影響が大きくなる可能性がある。
- (e) 同期参照信号を1つだけ用いるので装置の簡易化が望める。

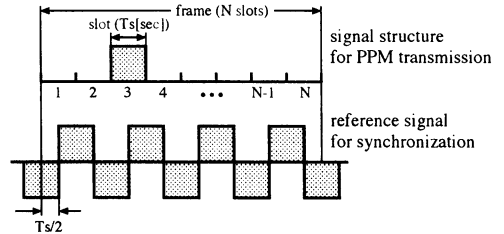


図4 本同期タイミング追跡法で利用する同期参照信号

本同期タイミング追跡法のシステム構成を図5に示す。まず、同期ループへの入力信号と同期参照信号を乗算し、相関をとる。その相関出力をループフィルタ (Loop Filter, LF) に入力し、積分が行われ、Sカーブに従って出力される。電圧制御クロック (Voltage Control Clock, VCC) では、LFの出力に比例したクロックが出力される。最後に、そのクロックタイミングにより受信側での同期用参照信号発生器のタイミングが調整される。

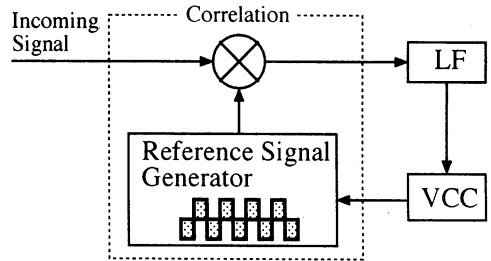


図5 提案同期ループ

### 4. 性能解析

PPMのフレーム信号を $S_{ppm}(t)$ とすると、受信信号 $r(t)$ は

$$r(t) = AS_{ppm}(t - T_d) + n(t) \quad (1)$$

となる。ただし、 $A$ は振幅、 $T_d$ は伝搬等による遅延量、 $n(t)$ は両側パワースペクトル密度が $N_0/2$ の白色ガウス雑音である。

同期用参照信号 $S_{tmp}(t - \hat{T}_d)$ と乗算し、その相互相関ネットワークの出力は

$$r(t)S_{tmp}(t - \hat{T}_d) = E \left[ AS_{ppm}(t - T_d)S_{tmp}(t - \hat{T}_d) \right] + n_{self}(t, T_d - \hat{T}_d) + n(t)S_{tmp}(t - \hat{T}_d) \quad (2)$$

となる。ただし、第1項は平均値、第2項は変動分(自己雑音成分)、第3項は雑音成分である。

PPM 信号波形を矩形波とすると、第1項はSカーブのピーク値が  $AT_s/T_s = A$  となるため、 $A(T_d - \hat{T}_d)/T_s$  ( $T_s$  はスロット幅)となる。第2項は0と近似し、第3項は noise と表すものとする。相互相関ネットワーク出力の誤差信号  $\varepsilon(t)$  は

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= A \times \frac{T_d - \hat{T}_d}{T_s} + \text{noise} \\ &= A \left\{ \frac{T_d - \hat{T}_d}{T_s} + \frac{\text{noise}}{A} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。その後、ループフィルタ(LF)を通り、電圧制御クロック(VCC)に入力される。その遅延推定誤差は、 $\lambda/T_s = (T_d - \hat{T}_d)/T_s$  とすると、

$$\begin{aligned} \left(\frac{\lambda}{T_c}\right)^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 G_{\text{noise}}(f) dt \\ &= \frac{NB_n T_s}{2 \log_2 N} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ただし、 $H(f)$  はフィードバック型閉ループフィルタ、 $G_{\text{noise}}(f)$  は式(3)の第2項のパワースペクトル密度であり、それは  $N \times N_0/2A^2$  となる。 $N$  は1フレーム当りのスロット数である。

1フレーム当りのパルス数を  $M(\geq 2)$  とするマルチパルス・パルス位置変調(MPPM)方式の場合には、次式となる。

$$\left(\frac{\lambda}{T_c}\right)^2 = \frac{MNB_n T_s}{2 \log_2(NC_M)} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1} \quad (5)$$

MPPM方式の遅延推定誤差の2乗平均値がPPM方式よりも  $M \log_2 N / \log_2(NC_M)$  倍小さくなる事が分かる。また、スロット数  $N$  が2の場合の式(4)は、従来のスペクトル拡散通信に利用されている1Δ型DLL(分散:  $B_n T_s/2(E_b/N_0)^{-1}$ )と2Δ型DLL(分散:  $2B_n T_s(E_b/N_0)^{-1}$ )の中間的な特性となる事が分かる。これはSカーブ自体は1Δ型DLLと同じではあるが、Nスロット間の雑音を加算してしまうことに起因する。

### 5. む す び

本稿では、情報復調用のテンプレート信号を1/2パルス時間シフトした信号を同期用参照信号として用いるPPM-UWB IRのための同期タイミング追跡法を示した。また、パルス波形が矩形の場合のジッタ理論式を導出した。本方式は、復調用テンプレート信号を用いる従来の同期法に(a)PPMパルスの表現(極性)の工夫と(b)1つの参照信号のみを用いる工夫を施し、次の点の対処を可能にした。(i)PPMパルスのスロット位置に依存しないこと、(ii)1フレーム当りのスロット数増加に対処できること、(iii)MPPMに拡張できること、(iv)常に適切なSカーブが作れること、である。

本同期タイミング追跡法はパルスが複数のスロットに亙ってしまう場合にも対処することができるため、今後、矩形波以外のパルス波形の場合について検討する予定である。さらに、本同期タイミング追跡法では信号の存在しないスロットの雑音を加算してしまうため、その対処法について検討する。

- [1] 瀬川扇永, 河野隆二: "Ultra Wideband(UWB)-Impulse Radioにおけるタイミングジッタの存在下での同期追跡に関する検討", 電子情報通信学会総合大会, A-5-25, (2003年3月)
- [2] 角真悟, 太刀川信一: "UWB-IRにおけるDLLについて", 電子情報通信学会総合大会, A-5-26, (2003年3月)
- [3] 角真悟, 太刀川信一: "UWB-IR(TH/SS型)における同期追跡法の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2003-84, pp.25-30 (2003年12月)
- [4] 清水雄一郎, 眞田幸俊: "UWB通信システムにおける遅延ロケープの特性", 電子情報通信学会総合大会, A-5-27, (2003年3月)
- [5] William M.Lovell and J.Keith Townsend: "The Effects of Timing Jitter and Tracking on the Performance on Impulse Radio", IEEE J. on Selected Areas in Commun., Vol.20, No.9, pp.1646-1651, December 2002
- [6] 亀山義浩, 太刀川信一: "UWB-IR(TH/SS型)多元接続における直交化フィルタを用いた同期捕捉法の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2004-27 (SIP2004-46), pp.7-12 (2004年7月)
- [7] 古川潤, 眞田幸俊, 黒田忠広: "IR-UWBにおける新しい同期捕捉法の提案", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2003-168, pp.185-190 (2004年3月)
- [8] 古川潤, 眞田幸俊, 黒田忠広: "IR-UWBのマルチパルス通信路における高速同期捕捉方法の提案", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2004-42, pp.25-29 (2004年10月)
- [9] 前川健志, 大家隆弘, 入谷忠光: "UWB-IR(FH/SS型)におけるパワースペクトル密度分布マッチング高速同期捕捉法の提案", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2005-6, pp.31-36 (2005年6月)
- [10] 木村直樹, 佐々木重信, 周杰, 村松正吾, 菊池久和: "時間ホッピングUWB伝送におけるジッタの影響に関する一検討", 電子情報通信学会信越支部大会, H2, (2003年10月)
- [11] 小花恭一, 原田浩樹, 池本健太郎, 河野隆二: "UWB-IR通信における直交系列を用いた同期誤り検出に関する一検討", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2003-224(IT2003-106, ISEC2003-146), pp.191-196 (2004年3月)
- [12] 小野文枝, 羽瀧裕真: "UWB-IRにおけるマルチパルス・パルス位置変調方式のフレーム同期法", 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2004-19, (2004-07)
- [13] Fumie Ono and Hiromasa Habuchi: "On the Frame Synchronization Method for Pulse Position Modulation System", The 2004 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA 2004), Parma Italy, Paper#391, (October 2004)
- [14] 小野文枝, 羽瀧裕真: "同期信号埋め込み型パルス位置変調方式の誤り率特性", 電子情報通信学会総合大会, A-5-31, (2005-03)
- [15] Fumie Ono and Hiromasa Habuchi: "Frame Synchronization for PPM Systems", 2005 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2005) Jeju, Korea, THF3-1, CD-ROM (July 2005)
- [16] Fumie Ono and Hiromasa Habuchi: "PPM Systems that Embedded Frame Timing Signal", 2005 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2005), Aalborg, Denmark, pp.1714-1717 (September 2005)
- [17] Azumi Ito, Hiromasa Habuchi, and Fumie Ono: "Proposal of a Simple Synchronization Method for CSK/SS", 電子情報通信学会論文誌(EA), Vol.E88-A, No.6, pp.1455-1461, (2005-6)
- [18] 伊藤あづみ, 羽瀧裕真, 小野文枝: "タイムホッピング型CSKのための同期法の提案", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-5-10, (2004-09)
- [19] 羽瀧裕真, 伊藤あづみ: "マンチェスタ符号化PN系列対を用いたCSKのための同期法", 電子情報通信学会総合大会, A-5-13, (2003-03)