

# チャープ波形を用いた UWB 車車間測距方式に関する一検討

## A Study on UWB Inter-Vehicle Ranging System Using Chirp Waveforms

土井 啓佑\*                      松村 健\*                      水谷 克也\*                      辻 宏之†  
Keisuke Doi                      Takeshi Matsumura                      Katsuya Mizutani                      Hiroyuki Tsuji

若菜 弘充†                      大森 慎吾†                      河野 隆二\*  
Hiromitsu Wakana                      Shingo Ohmori                      Ryuji Kohno

**Abstract**— In this paper we propose a novel inter-vehicle UWB ranging system using chirp waveforms instead of the conventional UWB-IR ranging system using Gaussian monocycles. In the proposed system, the transmitted signal consists of a linear combination of chirp signals with the same time duration, but different frequency bands. It is considered that the channel model of inter-vehicle communication system is a two-path channel. The proposed system and conventional UWB-IR ranging system is evaluated in the two-path channel model. And the proposed system can achieve better performance. Moreover, the proposed technique can suppress the peak power and to accomplish the same range resolution of conventional UWB-IR radar.

**Keywords**— UWB, ITS, chirp, radar

### 1 はじめに

近年、情報通信技術を用いて人、道路、車両をネットワーク化することにより安全かつ効率的な交通環境を実現する高度交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) が注目されている。ITS の目的の一つとして交通事故防止が挙げられ、事故防止のために車車間の測距技術は不可欠である。その一方、通信・測距方式として UWB-IR (Ultra Wideband-Impulse Radio) 方式が注目を浴びている [1]。UWB-IR 方式は超広帯域を占有するインパルス信号を用いるため、現在実用化されている FM-CW (Frequency Modulated Continues Wave) 等よりも高精度な測距を行うことが可能である。UWB-IR 方式はパルス性の信号を用いるため、測距可能距離をあげようとした場合、瞬時ピーク電力の増加が問題となる。そこで、瞬時ピーク電力を増加することなく送信電力を増加するためにチャープ波形を UWB 測距方式に適用する。チャープ波形はモノサイクル波形よりも十倍以上長

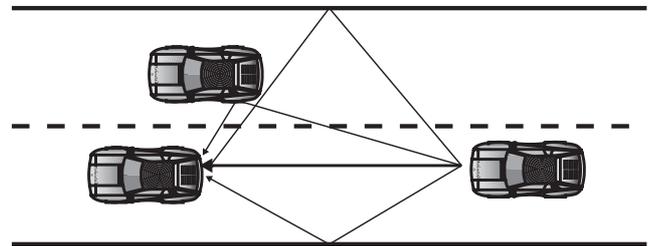


図 1: 車車間マルチパス伝搬図

い時間長を持ち、モノサイクル波形と同等の自己相関の鋭さを持つ波形である。提案方式ではユーザ識別をおこなうために、使用帯域をいくつか分割し各周波数区間を占有するアップチャープを生成する。そしてこのチャープ波形をユーザごとに割り当てられた PN 系列にしたがって送信することで測距波形とし、ユーザ識別を行う。

AWGN 通信路において本方式の測距性能を UWB-IR 方式と比較すると、他車両のレーダ波が存在しない時は UWB-IR 方式と同等の測距性能を得られ、他車両存在時は UWB-IR 方式よりも測距誤り率を改善できた [2]。しかし車車間通信・測距においては路面反射フェージングの影響を考慮する必要がある、通信路モデルは 2 波モデルになると考えられている [3]。本稿ではこの 2 波モデルを用いて提案方式の測距性能の評価を行う。

### 2 車車間通信路モデル

車車間通信における電波伝搬の様子を図 1 に示す。見通し確保ができる場合の車車間通信においては、直接波と周囲からの反射波によってマルチパス伝搬路になる。特に路面からの反射波は直接波との到来角度差が小さくなり、反射の大きさも直接波の大きさに近づくので、大幅な信号劣化が起こることが予想される。また伝搬の時間遅延も小さいため、高いパス分解能力を持つ UWB 信号であってもその影響を無視できないと考えられる。本稿では車車間通信路モデルを図 2 に示すような 2 波モデルとして扱う [3]。

自由空間伝搬において送信電力  $P_t$  で送信した時、伝

\* 〒 240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79 - 5 横浜国立大学大学院 工学府 物理情報工学専攻 Div. of Comp. and Elec. and Faculty of Eng., Yokohama National University. 79-5 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama, Kanagawa, 240-8501, Japan. E-mail: k-doi@kohnolab.dnj.ynu.ac.jp

† 〒 184-8795 東京都小金井貫井北町 4-2-1 独立行政法人 通信総合研究所 Communications Research Laboratory, Independent Administrative Institution 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795 Japan.

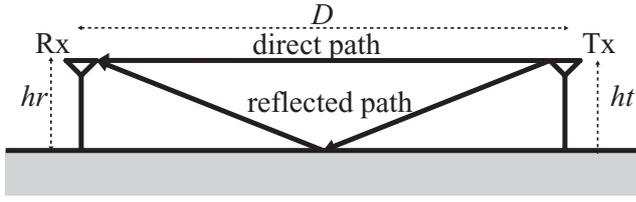


図 2: 2 波モデル

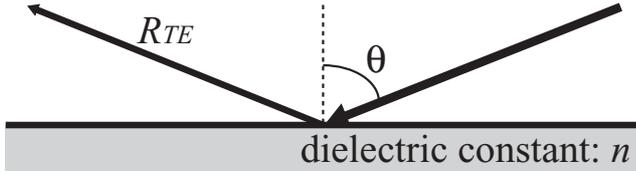


図 3: 路面反射

搬距離を  $D$  , 波長を  $\lambda$  とすると受信電力  $P$  は

$$P(D) = P_t + 20 \log \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

となる . 送信アンテナ高を  $h_t$  , 受信アンテナ高を  $h_r$  とすると路面反射時の入射角  $\theta$  は

$$\theta = \arctan \left( \frac{D}{h_t + h_r} \right) \quad (2)$$

なり , 直接波と路面反射波の行路差  $\Delta d$  は

$$\Delta d = \frac{h_t + h_r}{\cos \theta} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + D^2} \quad (3)$$

となる . またアスファルトの路面は複素誘電率  $n = 2.00 - j0.05$  の誘電体とみなすことができ , 垂直偏波のときの反射係数  $R_{TE}$  は

$$R_{TE} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

### 3 チャープ波形を用いた UWB 測距システム

#### 3.1 チャープ波形

チャープ波形は次式により表される [4] .

$$s(t) = \begin{cases} \sin(\omega_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2) & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

ここで  $\mu$  は角周波数掃引率 ,  $\omega_0$  は中心角周波数 ,  $T$  はチャープ信号の時間長である . また  $\Delta \omega (= 2\pi \Delta f)$  を角周波数掃引幅とすると  $\mu = \Delta \omega / T$  となる . またチャープ波形のマッチフィルタの出力はマッチフィルタのインパルス応答とのコンボリューションにより表される .

$$g(t) = s(t) * h_m(t) \quad (6)$$

$$= \begin{cases} \sqrt{T \Delta f} \frac{\sin(\frac{\mu T}{2} |t| - \frac{1}{2} \mu t^2)}{\frac{\mu T}{2} |t|} \cos(\omega_0 t) & |t| \leq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

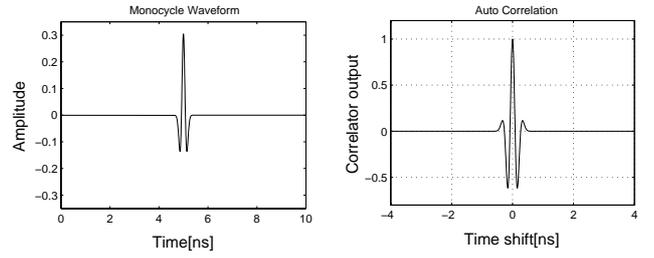


図 4: モノサイクル波とその自己相関

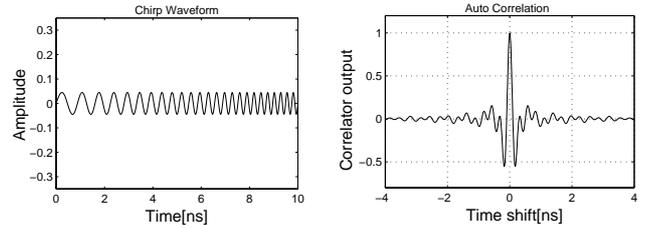


図 5: チャープ波とその自己相関

となる . ここで  $h_m(t)$  は整合フィルタのインパルス応答であり  $h_m(t) = s^*(-t)$  で表される .  $s^*(t)$  は  $s(t)$  の複素共役である .

#### 3.2 自己相関出力の比較

ここでモノサイクル波とその自己相関出力を図 4 に , チャープ波とその自己相関出力を図 5 に示す . 波形の帯域は両者ともに 3GHz , 電力は両者ともに正規化してある . チャープ波形は時間的に連続で振幅が一定であるが , 自己相関出力はモノサイクル波と同等の鋭いピークを持っている . チャープ波形を UWB 方式に適用することで , 距離検出精度を落とさずに電力のピークを抑えることが可能である .

#### 3.3 提案方式

提案方式のシステム構成を図 6 に示す . 提案方式では , 使用可能帯域を分割し各周波数区間を占有する時間長一定なアップチャープとダウンチャープを生成する . そしてこのチャープ波形をユーザごとに割り当てた PN 系列によって組み合わせることで , 測距波形を生成する .  $N$  個のチャープ波形を組み合わせることで測距波形を構成する場合 , それぞれのアップ・ダウンチャープ波形は , 使用可能な周波数帯域  $F$  を  $N$  等分した帯域幅  $\Delta f_n = F/N$  を占有する . 目標物との距離  $D$  は次式から算出できる .

$$D = \frac{c\tau}{2} \quad (8)$$

$\tau$  を送信波と受信波の時間差 ,  $c$  は光速である . 送信波と受信波の時間差を検出することで測距を行う . 測距用

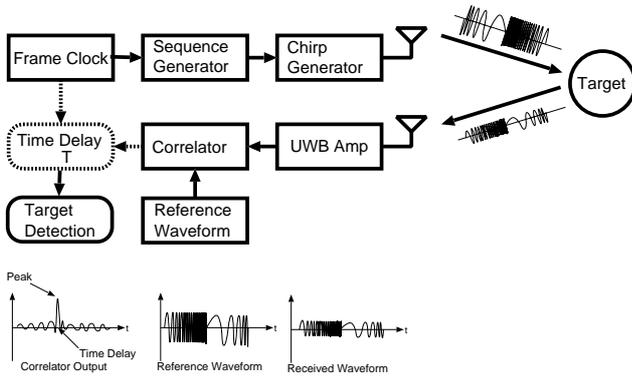


図 6: 提案方式ブロック図

の送信波  $m(t)$  は次式で表せる .

$$m(t) = \sum_{j=0}^{N_s-1} s_j(t - jT_f) \quad (9)$$

$$s_j(t) = \sin \left( \omega_{c_j} \left( t - \frac{T_f}{2} \right) + \frac{1}{2} \mu \left( t - \frac{T_f}{2} \right)^2 \right) \quad (10)$$

ここで  $N_s$  はチャープ波形の反復回数,  $s_j$  は  $j$  番目のチャープ波形,  $c_j$  は  $j$  番目のタイムホッピング系列,  $\omega_{c_j}$  は  $c_j$  により決定される中心角周波数であり, 周波数掃引率  $\mu$  は  $\mu = \Delta F_n / T_f$  で表される.

受信波  $m_{rec}(t)$  は目標物から反射したものであり, 次式で表せる .

$$m_{rec}(t) = m(t) + n(t) \quad (11)$$

ここで  $n(t)$  白色ガウス雑音, 遅延波, 他局波等の干渉波成分である. 受信機では, 送信波のレプリカを生成し受信波との相関をとり, その出力のピーク時間から目標物との距離を算出する .

生成された送信波のレプリカ波形  $m_{rep}(t)$  は

$$m_{rep}(t) = \sum_{j=0}^{N_s-1} s_{c_j}(t - jT_f) \quad (12)$$

で表され, 受信機の相関出力  $R(\tau)$  は次式で表される .

$$R(\tau) = \int_{-\frac{N_s T_f}{2}}^{\frac{N_s T_f}{2}} m_{rec}(t) m_{rep}(t + \tau) dt \quad (13)$$

ここで  $\tau$  は送信波と受信波の時間遅れである.  $c$  を光速とすると, 目標物との距離  $D$  は次式により算出される .

$$D = \frac{c\tau}{2} \quad (14)$$

## 4 提案測距方式の性能評価

### 4.1 提案方式と UWB-IR 方式の送信波形の比較

まず, UWB-IR 方式と提案方式との各ユーザの送信波形の比較をする. UWB-IR 方式と提案方式における各

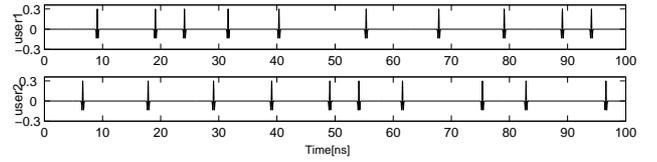


図 7: UWB-IR 方式のユーザごとの送信波形

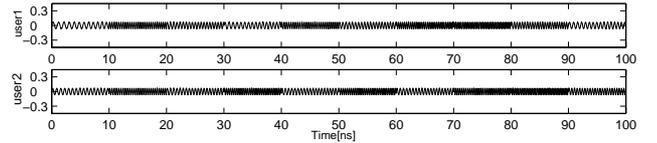


図 8: 提案方式のユーザごとの送信波形

ユーザの送信波形を図 7, 8 に示す. このように 2 方式のユーザ分別方法を違うものとした. また 1 周期あたりの送信電力をそろえた場合, 提案する UWB-CHIRP 方式は UWB-IR 方式に比べ送信波形のピーク値が低く抑えられている .

### 4.2 測距誤り率を用いた測距性能比較

#### 4.2.1 測距誤り率の定義

提案方式と UWB-IR 方式の測距性能の比較を, 測距誤り率を用いて行う. 測距誤り率を (15) 式によって定義する .

$$\text{測距誤り率} = \frac{\text{距離検出誤り回数}}{\text{総距離検出回数}} \quad (15)$$

ここで, 距離検出誤りとするのは, 目標値からの誤差が測距誤り閾値以上となった時とする .

#### 4.2.2 シミュレーション諸元

測距誤り率を用いた性能評価のシミュレーション諸元を表 1 に示す. UWB-IR 方式で使用するモノサイクル波形と提案方式で使用するチャープ波形の全波形の帯域幅は 3GHz とし, 2 方式間で等しくする. また伝搬路モデルは 2 波モデルとする .

#### 4.2.3 シングルユーザ時

車車間 2 波モデルにおけるシングルユーザ時の測距誤り率比較の結果を図 9 に示す .

図 9 から, 提案方式の方が UWB-IR 方式よりも測距誤り率特性を改善できることが確認できる. 通信路が AWGN チャンネルの場合, 他車両が存在しない環境において提案方式と UWB-IR 方式では同等の測距性能であった [2]. 提案方式は送信パルスとしてチャープ波形を用いている. チャープ波形は使用周波数帯域を一樣に占有するため周波数ダイバーシチ効果を得られ, UWB-IR 方式よりも測距特性を改善できている .

表 1: シミュレーション諸元

試行回数	20000
サンプリング間隔	0.01ns
タイムフレーム長 $T_f$	20ns
タイムフレーム反復回数 $N_s$	10
SNR	10dB-18dB
ユーザ数	1,5
PN 系列	OCC 系列
帯域幅	3GHz(1GHz ~ 4GHz)
通信路	2 波モデル
測定距離	5m
測距誤り閾値	30cm
送受信アンテナ高 $h_t, h_r$	0.5m

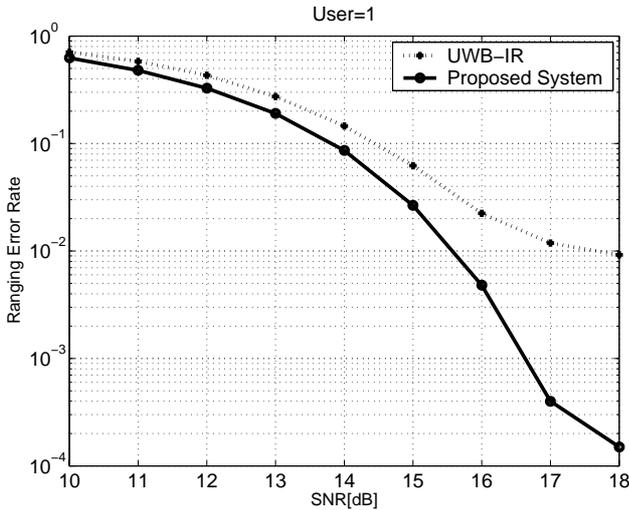


図 9: 測距誤り率を用いた測距性能比較

#### 4.2.4 マルチユーザ時

次に他車両存在時の測距誤り率を図 10 に示す．図 10 から，他車両存在時においても提案方式の方が UWB-IR 方式よりも測距誤り率特性を改善できることが確認できる．通信路が AWGN チャネルの場合においても提案方式の方が良い測距誤り率特性を示したが，2 波モデルにおいても UWB-IR 方式より優れた測距誤り率特性を示す．これは提案方式において，波形の直交性と系列の直交性を用いてユーザ識別を行っているためである．

## 5 結論

本論文では，車車間通信路モデルを 2 波モデルとみなした場合においてインパルスの代わりにチャープ波形を用いることで，提案方式送信時のピーク電力を抑えつつ UWB-IR 方式よりも良い測距誤り率特性を得られることを示した．また他車両存在時においても提案方式は

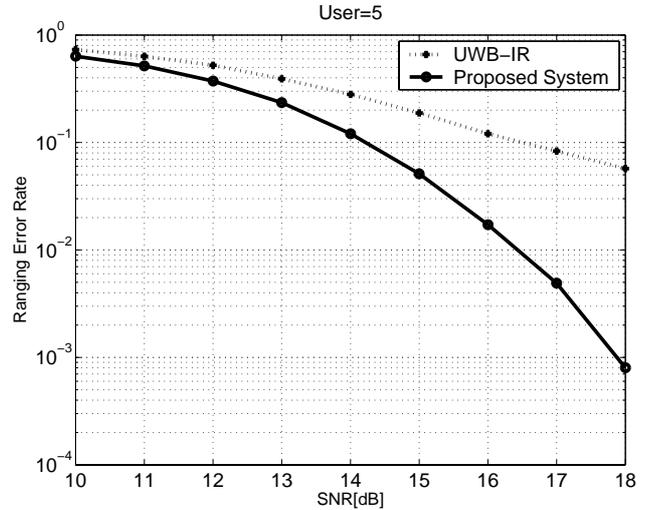


図 10: 他車両存在時の測距誤り率を用いた測距性能比較

UWB-IR 方式よりも測距誤り率を改善できることを示し，今後は，提案方式と他レーダ方式との相互干渉の影響評価，他の直交波形群を用いた方式との性能比較などを行っていく．

## 参考文献

- [1] Takeshi MATSUMURA, Kazuki ESHIMA, Katsuya MIZUTANI, Ryuji KOHNO "Inter-Vehicle Communication and Ranging System Using Ultra Wideband Impulse Radio," The 3rd International Workshop on ITS Telecommunications 2002, Seoul, pp.341-346, 2002
- [2] Keisuke Doi, Takeshi Matsumura, Katsuya Mizutani, Ryuji Kohno "Ultra Wideband Ranging System Using Improved Chirp Waveform," Radio and Wireless Conference 2003, Boston, pp.207-211, August, 2003
- [3] 唐沢 好男, "ITS ミリ波車車間通信の路面反射フェージングとスペースダイバーシチに関する基礎的検討," 電子情報通信学会論文誌, vol.J83-B, no.4, pp.518-524, April, 2000
- [4] Yoshiyuki TOMIZAWA Masanobu HIROSE Ikuo ARAI Kazuo TANABE, "A Novel Subsurface Radar Using a Short Chirp Signal to Expand the Detection Range," IEICE Trans. Commun., Vol.E83-B, No.10, pp.2427-2434, October 2000