

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.013

引用格式:赵兴运,张群,娄昊,等.基于OFDM随机步进频的雷达通信一体化信号模型[J].电讯技术,2014,54(8):1107-1112. [ZHAO Xing-yun,ZHANG Qun, LOU Hao, et al. A Signal Model for Integration of Radar and Communication Based on Random Stepped-frequency OFDM Radar Pulses[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(8):1107-1112.]

基于 OFDM 随机步进频的雷达通信一体化信号模型*

赵兴运^{1,**}, 张 群¹, 娄 昊¹, 李晓辉², 罗 迎¹

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077; 2. 解放军 94789 部队, 南京 210000)

摘要:为了解决雷达通信一体化系统中的雷达信号与通信信号较难分离的问题,在正交频分复用(OFDM)雷达的基础上,提出了一种基于 OFDM 脉间随机步进频的雷达通信一体化信号模型,通过频率捷变将数据信息加载到雷达信号上,利用随机的步进频率传输数据,从而使一体化信号能同时实现雷达探测和数据通信功能,避免了信号分离。同时设计了雷达通信一体化方案,在雷达接收端,运用相关法实现一维距离成像;在通信接收端,通过带通滤波器组检测频率点解调数据。仿真实验结果表明,一体化信号能够实现分米级的距离高分辨和速率为 Mbit/s 级的数据通信,能够满足大批量数据传输的要求。

关键词:雷达通信一体化;随机步进频率;正交频分复用;数据通信

中图分类号:TN955 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1107-06

A Signal Model for Integration of Radar and Communication Based on Random Stepped-frequency OFDM Radar Pulses

ZHAO Xing-yun¹, ZHANG Qun¹, LOU Hao¹, LI Xiao-hui², LUO Ying¹

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit 94789 of PLA, Nanjing 210000, China)

Abstract:To solve the problem of signal separation in the system of integration of radar and communication, a signal model based on random stepped-frequency Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) radar pulses is proposed. By the frequency agility, the communication data is modulated on the radar pulses and then transmitted through random stepped-frequency pulses. Thus, the target range image can be acquired from the correlation of the echo signal and the reference signal, while the communication data is demodulated by means of frequency detection through bandpass filter group without signal separation. Finally, simulation results show that the designed signal realizes decimeter range resolution imaging and high-rate data transmitting in Mbit per second, which can satisfy the requirements of transmitting the mass data.

Key words:integration of radar and communication; random stepped-frequency signal; OFDM; data communication

1 引言

雷达通信一体化可将雷达探测与数据通信功能结合起来,使雷达的优良性能为通信所用,在目标探

测的同时实现快速的大容量数据传输,进一步提高设备的利用率,减小电子设备所占空间,以满足信息化战场的军事需求^[1-2]。目前,国内外学者对雷达

* 收稿日期:2014-01-26;修回日期:2014-04-11 Received date:2014-01-26;Revised date:2014-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172169);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JQ8036)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61172169); The Provincial Natural Science Foundation Research Project of Shaanxi Province(2012JQ8036)

** 通讯作者:zhaoxingyun123@126.com Corresponding author:zhaoxingyun123@126.com

与通信的一体化设计方案做了许多研究,其中基于波形共享的一体化信号设计是主要研究方向之一。

在雷达通信一体化波形设计中,直接采用雷达信号和通信信号叠加的方式生成一体化信号是一种较为直接的思路^[3]。文献[4]采用共享雷达的发射机、天线和接收机完成信号的所有接收/发送功能,并在发射端添加实现通信系统所需要的编码器、加密处理器、调制设备等,实现雷达通信混合一体化信号的产生,但在接收端要设计信号分离器将通信信号和雷达信号进行分离,否则信号间会相互干扰。如果能设计一种一体化信号,通过参数调制将通信数据加载在雷达信号上,并且保证通信数据的随机性不会对雷达探测产生影响,那么在接收端就不需要进行信号分离。要让雷达信号实现通信功能,关键是将数据信息调制到雷达信号上。Chirp 信号是常用的雷达信号,经过设计可以实现通信功能。文献[5]中提出了基于同调频率不同初始频率 Chirp 序列组的雷达通信一体化方案,可在不影响雷达性能的前提下,采用分数阶傅里叶变换实现单 Chirp 信号多比特的数据传输。文献[6]提出了基于频分准正交多载波 Chirp 信号的雷达通信一体化波形及其相应的系统实现方法,但由于信号的不完全正交,在目标运动时,会存在严重的邻道干扰。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术是一种在通信系统中广受关注的多载波数字调制方式,在雷达领域的应用最早由 Jankiraman 等人提出,并设计了名叫 PANDORA 的调频连续波雷达^[7]。进一步研究表明,OFDM 雷达具有低截获概率、高分辨率和抗干扰等优点^[8-9],已成为国内外学者研究的热点。文献[10]提出了一种利用频率步进的 OFDM 信号,使雷达系统同时获得频率捷变和距离高分辨的方法。受此启发,本文将数据信息通过频率捷变调制到频率步进的 OFDM 信号上,提出了一种基于 OFDM 脉间随机频率步进的雷达通信一体化信号模型,在雷达距离高分辨成像的同时,实现了通信功能。

2 一体化信号模型

基于 OFDM 的频率步进雷达,通过发射一系列脉冲信号构成的脉冲串来实现雷达的高分辨。每个子脉冲是 OFDM 信号,含有 N 个载频,相邻载频间的频差为 Δf ,子脉冲的带宽为 $B_0 = N\Delta f$,那么子脉冲 $p(t)$ 可表示为

$$p(t) = \sum_{n=1}^N \omega_n \text{rect}\left(\frac{t-T_p/2}{T_p}\right) \exp(j2\pi n\Delta f t) \quad (1)$$

其中, T_p 为 OFDM 脉冲持续时间, ω_n 为频率加权系数, $\text{rect}(t)$ 为单位矩形窗函数:

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

为保证子载波的正交性,频差 Δf 与脉冲持续时间 T_p 满足关系 $\Delta f = 1/T_p$ 。

假设脉冲串含有 M 个子脉冲,均匀步进雷达相邻子脉冲间频差固定为 B_0 ,脉冲串信号的总带宽为 $B = MB_0$,雷达发射脉冲示意图如图 1 所示。但均匀步进频信号不能直接调制随机数据信息,因此,本文提出一种随机步进频的雷达通信一体化信号模型。在随机步进频信号模型中相邻子脉冲间频差并不固定,而是在一定范围内随机分布,且频差值是 B_0 的整数倍,这就为加载通信数据提供了可能,随机步进频信号发射脉冲示意图如图 2 所示。

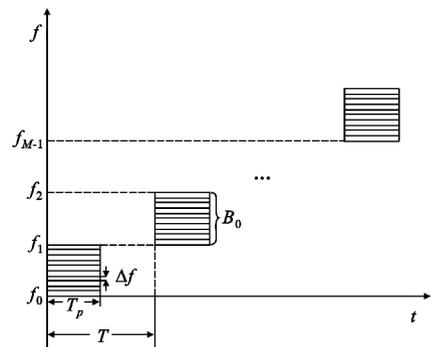


图 1 均匀步进频率发射脉冲示意图
Fig. 1 The pulses of linear stepped-frequency radar

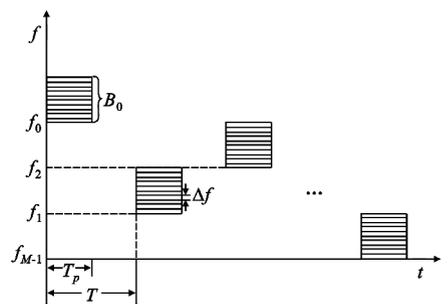


图 2 随机步进频率发射脉冲示意图
Fig. 2 The pulses of random stepped-frequency radar

在图 2 中, f_m 为第 M 个子脉冲的起始频率,其数学表达式为

$$f_m = f_c + d_m B_0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3)$$

其中, f_c 为发射载频, d_m 为随机数且 $d_m \in \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 。发射的脉冲串信号为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} p_m(t-mT) \exp(j2\pi f_m t) \quad (4)$$

其中, $p_m(t)$ 为第 m 个子脉冲的 OFDM 信号包络, f_m 为第 m 个子脉冲的起始频率, T 为脉冲重复周期。利用通信数据来生成随机数 d_m , 进而产生雷达通信一体化信号为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N \omega_n \text{rect}\left(\frac{t-T_p/2-mT}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi n \Delta f t) \exp[j2\pi(f_c + d_m B_0)t] \quad (5)$$

3 雷达通信一体化方案及性能分析

基于 OFDM 的随机频率步进信号一方面利用步进信号合成的大带宽实现雷达的高分辨率成像, 一方面利用随机的步进频率传输数据, 从而实现雷达通信一体化。这里所设计的雷达通信一体化方案主要基于机载雷达, 由于雷达天线的方向性较强, 因此其通信方式更倾向于飞机与飞机之间的点对点通信。典型的应用背景为预警机利用其先进的雷达将探测到的战场态势信息发给僚机, 通过雷达通信一体化实现战场信息共享。其信号处理的主要流程为: 在发射端, 将二进制的传输数据经串并变换后转化成随机的 $M (M=2^k)$ 进制数据, 将产生的 OFDM 雷达脉冲用 M 进制数据调制成随机步进频率的脉冲串信号, 再经过上变频后发射。在雷达接收端, 利用参考信号与回波信号进行相关处理, 得到一维距离像; 在通信接收端, 利用带通滤波器组对信号进行检测, 判决出其步进频率, 从而获取数据信息, 实现数据通信。这种一体化信号设计方案避免了雷达信号与通信信号的分离, 大大降低了设备的复杂度, 并且不存在将信号直接叠加所造成的信号间干扰, 优势明显, 其流程图如图 3 所示。

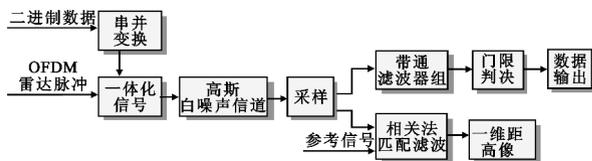


图 3 雷达通信一体化信号处理流程图
Fig. 3 The signal processing of integration of radar and communication

3.1 相关法距离成像

一体化信号由于加载了数据信息, 具有一定的随机性, 其发射的每个脉冲串中的载频点随机分布。均匀步进频率信号的距离成像, 可对回波信号进行 FFT 处理而直接得到, 但对于随机步进频率信号这

种成像方法并不适用。本文通过分析回波信号与参考信号的相关性, 利用统计的方法来实现距离成像。

假设只有一个静止点目标 P , 目标探测距离为 R , 由式(5)知, 发射的一体化信号为 $s(t)$, 则回波信号为

$$s(t-t_d) = \sigma \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N \omega_n \text{rect}\left(\frac{t-t_d-T_p/2-mT}{T_p}\right) \cdot \exp[j2\pi n \Delta f(t-t_d)] \cdot \exp[j2\pi(f_c + d_m B_0)(t-t_d)] \quad (6)$$

其中, σ 为目标反射系数, ω_n 为频率加权窗函数, t_d 为回波信号时延, $t_d = 2R/c$ 。将回波信号与发射的脉冲串参考信号作相关, 计算相关输出:

$$\text{corr}(\tau) = \int_0^{MT_p} s(t-t_d) s^*(t-\tau) dt \quad (7)$$

将式(5) ~ (6) 代入式(7), 进一步计算得

$$\text{corr}(\tau) = \int_0^{MT} \left\{ \sigma \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N \omega_n \text{rect}\left(\frac{t-t_d-T_p/2-mT}{T_p}\right) \cdot \exp[j2\pi n \Delta f(t-t_d)] \exp[j2\pi(f_c + d_m B_0)(t-t_d)] \right\} \cdot \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{q=1}^N \omega_q \text{rect}\left(\frac{t-\tau-T_p/2-mT}{T_p}\right) \cdot \exp[-j2\pi q \Delta f(t-\tau)] \exp[-j2\pi(f_c + d_m B_0)(t-\tau)] \right\} dt \quad (8)$$

利用 OFDM 信号的正交性, 对式(8) 化简得

$$\text{corr}(\tau) = MT\sigma \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N \omega_n^2 \exp[j2\pi(f_c + n \Delta f + d_m B_0)(\tau-t_d)] \quad (9)$$

假设数据 d_m 在集合 $\{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 内等概率分布, 令 $B_m = d_m B_0$, $A = MT\sigma$, 频率加权系数 $\omega_n^2 = 1$, 相关输出的期望为

$$E[\text{corr}(\tau)] = AM \sum_{m=0}^{M-1} p(B_m) \cdot \exp[j2\pi(f_c + n \Delta f + B_m)(\tau-t_d)] = A \exp[j2\pi f_c(\tau-t_d)] \frac{\sin[\pi MN \Delta f(\tau-t_d)]}{\sin[\pi \Delta f(\tau-t_d)]} \quad (10)$$

分析式(10) 可以得到相关输出的期望幅度是函数 $\frac{\sin(N\pi x)}{\sin(\pi x)}$, 该函数在 $x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 取得

最大值, 因此当 $\tau-t_d = \frac{k}{\Delta f} (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,

$E[\text{corr}(\tau)]$ 取得最大值, 测得目标距离为 $R = \frac{c}{2} (t_d + \frac{k}{\Delta f})$, 由此可知相关法距离成像会重复出现, 重复距离为 $R_a = \frac{c}{2\Delta f}$, 其产生原因是频率点的离散抽取, 而

在连续的均匀分布情况下,得到的结果为 sinc 函数,不会出现距离像的重复。通过选择合适的 Δf 及距离观测窗可以去除重复。

3.2 距离分辨率分析

在雷达探测中,距离分辨率与信号带宽有关,其关系满足 $\Delta r = c/2B$, c 为光速, B 为信号带宽。因此,要实现高分辨率距离成像,必须使用大带宽信号。利用频率步进信号可以利用离散的方法逼近大功率脉冲,从而合成大带宽信号^[11]。而本文设计的一体化信号是随机步进频率,在一个观测窗内,信号的带宽也是随机的,所以分辨率不是恒定的。

假设一个子脉冲传输 3 b 数据,其对应的十进制数据在 0~7 之间随机分布,一帧信号里含有 8 个子脉冲,信号的总带宽为 B 。由于数据的随机性,在一个观测窗内信号的带宽是变化的,其取值范围是 $B \in \{B_0, 2B_0, 3B_0, 4B_0, 5B_0, 6B_0, 7B_0, 8B_0\}$,由于数据满足均匀分布,计算可得其概率分布如表 1 所示。

表 1 随机步进频率脉冲串信号带宽分布
Table 1 The distribution of bandwidth of random stepped-frequency radar signal

带宽	概率
B_0	4.76×10^{-7}
$2B_0$	4.17×10^{-4}
$3B_0$	0.02
$4B_0$	0.17
$5B_0$	0.42
$6B_0$	0.31
$7B_0$	0.07
$8B_0$	0.002

信号带宽的期望

$$E(B) = \sum_{i=1}^8 P(iB_0) iB_0 = 5.25B_0 = 0.625B \quad (11)$$

由以上分析可知,一体化信号的带宽不是恒定的,不能达到所设计的总带宽,但其平均带宽总在设计总带宽的一半以上,且随着子脉冲传输比特数的增加越来越接近半个设计总带宽。实际总带宽的下降将导致分辨率的降低,因此一体化信号是牺牲了一定的雷达分辨率来实现数据通信功能。在参数设置的时候,要同时考虑分辨率和数据通信效率的要求。在对分辨率要求很高的情况下,可以通过增加脉冲串子脉冲的个数来增加信号带宽,从而达到距离高分辨。

3.3 数据接收误码率分析

在数据接收端,利用一组带通滤波器来检测信

号, M 路带通滤波器的输出只有一路含有信号加噪声,其他各路输出只含噪声,通过比较各路输出幅度的大小,最大的判为有信号输出。当有一路输出噪声大于有信号的那路输出时,发生误判。假设 M 路带通滤波器中的噪声是相互独立的窄带高斯噪声,其包络服从瑞利分布。有信号输出的那路电平设为 h ,一路滤波器的噪声输出包络超过 h 的概率为 $P(h)$,由瑞利分布公式得

$$P(h) = \int_h^{\infty} \frac{x}{\sigma_n^2} e^{-x^2/2\sigma_n^2} dx = e^{-h^2/2\sigma_n^2} \quad (12)$$

式中, σ_n^2 为输出的噪声功率,发生错判的概率为

$$P_e(h) = 1 - [1 - P(h)]^{M-1}$$

其和门限值 h 有关,而 h 服从广义瑞利分布 $p(h)$,最终的误码率为

$$P_e = \int_0^{\infty} p(h) P_e(h) dh = \sum_{m=1}^{M-1} (-1)^{m-1} C_{M-1}^m \frac{1}{m+1} e^{-ma^2/2(m+1)\sigma_n^2} \quad (13)$$

式(13)是一正负交替的多项式,随着项数增加,其值起伏振荡,但可以证明它的第一项是上界^[12],即有

$$P_e \leq \frac{M-1}{2} e^{-a^2/4\sigma_n^2} < \exp[-k(\frac{r_b}{2} - \ln 2)] \quad (14)$$

其中, k 为每个码元所含比特数, r_b 为比特信噪比。由误比特率与误码率关系可进一步得到误比特率

$$P_b = \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} P_e < \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} \exp[-k(\frac{r_b}{2} - \ln 2)] \quad (15)$$

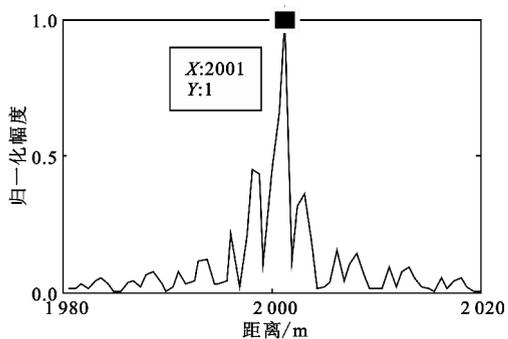
由式(15)可以看出,只要保证比特信噪比 $\frac{r_b}{2} -$

$\ln 2 > 0$, 即 $r_b > 1.42$ dB,随着 k 的不断增大,误比特率不断减小,而 k 的增大会使信号占用带宽增大,换言之,就是以增大占用带宽来换取误码率的降低。

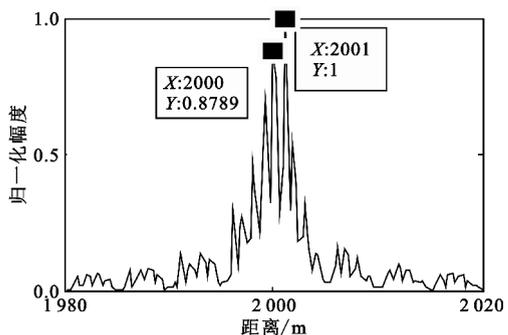
4 系统仿真实验

4.1 一维距离像仿真

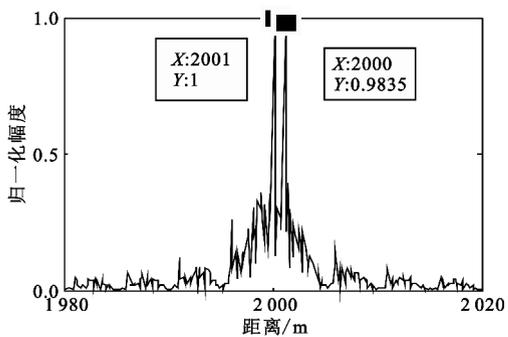
为了验证文中所提方案的有效性,采用点散射模型进行仿真。假设有两个点目标,距离分别为 $R_1 = 2000$ m, $R_2 = 2001$ m, 散射系数 $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$, 雷达的发射频率为 1 GHz, 子脉冲 OFDM 信号的带宽 $B_0 = 30$ MHz, 频点 $N = 20$, 频率间隔为 $\Delta f = 1.5$ MHz, 信噪比 $SNR = 10$ dB, 每个脉冲串含有的子脉冲个数 M 分别为 8、16、32 时,利用相关法成一维距离像,其仿真结果如图 4 所示。



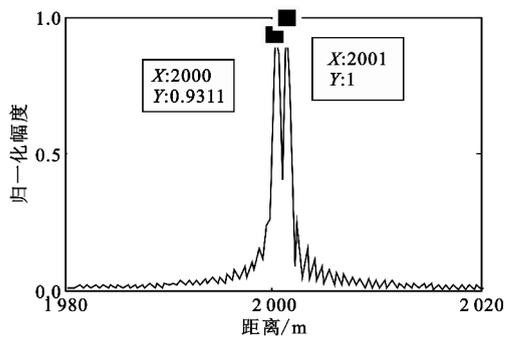
(a) $M=8$, 一维距离像



(b) $M=16$, 一维距离像



(c) $M=32$, 一维距离像



(d) $M=32$, 加窗一维距离像

图 4 不同带宽下的一维距离像

Fig. 4 The range profile in different bandwidths

如图 4(a)所示,在 $M=8$ 的情况下,设计总带宽 $B=240$ MHz,平均带宽 $E(B)=157.5$ MHz,平均分辨率为 $\Delta r=0.9524$ m,两个点目标间的距离为 1 m,

理论上可以分辨出两个点目标,但由于频率的随机性与噪声影响,实际仿真结果并不能有效分辨;在 $M=16$ 的情况下,平均分辨率为 $\Delta r=0.625$ m,如图 4(b)所示,可以进行有效分辨,但旁瓣较高,会对目标产生误判,成像效果并不理想;进一步增加步进频率个数, $M=32$ 时, $\Delta r=0.4688$ m,仿真结果如图 4(c)所示,旁瓣峰值较小,但仍存在。为进一步抑制旁瓣,将频率加权系数 ω_n 设定为余弦平方窗函数,即 $\omega_n = \cos^2(\pi n \Delta f / B_0)$,其仿真结果如图 4(d)所示,旁瓣得到有效抑制,成像结果较为理想。

此外,在 $\Delta f=1$ MHz 的情况下,重复距离 $R_a = \frac{c}{2\Delta f} = 150$ m,此时可以利用低分辨雷达对目标区域进行粗测,确定目标的大概范围,然后设置距离观测窗(窗长小于 150 m)进行高分辨成像,进而消除重复距离的影响。

4.2 通信性能仿真分析

仿真参数与距离像仿真参数相同,子脉冲的宽度为 $T_p = 1/\Delta f = 0.67 \mu\text{s}$,每个子脉冲可以传输 k 比特数据, $k = \text{lb}M$,假设脉冲的占空比为 0.2,数据的传输速率为 $0.3k$ Mb/s,当 $M=32$,传输速率可达到 1.5 Mb/s。系统通信的误比特率与信号的设计带宽有关,即与每个脉冲传输的比特数 k 有关,在 k 取不同值时,系统误比特率与信噪比关系如图 5 所示。

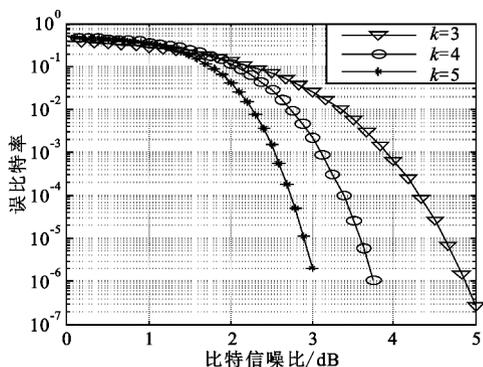


图 5 不同带宽下误比特率与比特信噪比的关系

Fig. 5 The curve of BER and SNR in different bandwidths

由图 5 可知,在比特信噪比 r_b 较小 ($r_b < 1.42$ dB) 时,不同 k 值对误比特率的影响不明显,当比特信噪比不断增大, k 值越大,误比特率越小;当比特信噪比大于 4 dB 时,误比特率均达到 10^{-3} 以下,能够满足通信的要求。

5 结束语

本文针对雷达通信一体化系统中雷达信号与通信信号较难分离的问题,提出了一种基于 OFDM 的

脉间随机步进频的雷达通信一体化信号模型。在雷达接收端,通过相关法进行一维距离高分辨成像;在通信接收端,通过检测信号频点来解调数据,避免了对雷达信号与通信信号的分离,大大降低了系统的复杂度,进而同时实现雷达探测和通信数据的传输。其特殊之处在于利用随机的频点来传输数据,在保证雷达性能的前提下实现了通信功能,这是未来一体化电子战系统的重要发展方向之一。应当指出的是,本文只对静止目标的探测进行了仿真,验证了模型的正确性及有效性,对于高速运动目标的情况,将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 林志远,刘刚. 雷达-电子战-通信的一体化[J]. 上海航天,2004(6):55-58.
LIN Zhi-yuan, LIU Gang. The Integration of Radar-Electronic Warfare-Communication[J]. Aerospace Shanghai,2004(6):55-58. (in Chinese)
- [2] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
ZHANG Ming-you survey on. Survey on Radar-Electronic Warfare-Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] Mannori S. A dual-use system for radar and communication with complete complementary code[C]//Proceedings of The 11th Radar Symposium (IRS). [S. l.]:IEEE, 2010:1-4.
- [4] 李晓柏,杨瑞娟,程伟. 基于 Chirp 信号的雷达通信一体化研究[J]. 雷达科学与技术,2012,10(2):180-186.
LI Xiao-bai, YANG Rui-juan, CHENG Wei. Integrated Radar and Communication Based on Chirp[J]. Radar Science and Technology,2012,10(2):180-186. (in Chinese)
- [5] 邹广超. 雷达通信一体化设计的信号与处理方法研究[D]. 无锡:江南大学,2011.
ZOU Guang-chao. Research on Radar communication Integrated design of signal and Processing Methods [D]. Wuxi: Jiangnan University,2011. (in Chinese)
- [6] 李晓柏,杨瑞娟,陈新永,等. 基于分数阶傅里叶变换的雷达通信一体化信号共享研究[J]. 信号处理,2012,28(4):487-494.
LI Xiao-bai, YANG Rui-juan, CHEN Xin-yong, et al. The Sharing Signal for Integrated Radar and Communication Based on FRFT [J]. Signal Processing, 2012, 28(4):487-494. (in Chinese)
- [7] Jankiraman M, Wessels B J, Van Genderen P. System design and verification of the PANDORA multifrequency radar[C]// Proceedings of 1999 International Conference on Radar Systems. Brest, France:IEEE,1999:1-9.
- [8] Sen S, Nehorai A. A daptive design of OFDM radar signal with improved wideband ambiguity function[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2):928-933.
- [9] Schuerger J, Garmatyuk D. Performance of random OFDM radar signals in deception jamming scenarios [C]//Proceedings of 2009 IEEE National Radar Conference. Pasa-

dena, CA:IEEE, 2009:1-5.

- [10] Lellouch G, Pribic R, van Genderen P. Frequency agile stepped OFDM waveform for HRR [C]//Proceedings of 2009 International Waveform Diversity and Design Conference. Kissimmee, FL:IEEE,2009:90-93.
- [11] 霍凯,姜卫东,黎湘,等. 一种新的 OFDM 相位编码频率步进雷达信号及其特性[J]. 电子与信息学报,2011,33(3):677-683.
HUO Kai, JIANG Wei-dong, LI Xiang, et al. A New OFDM Phase-coded Stepped-frequency Radar Signal and Its Characteristic. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3):677-683. (in Chinese)
- [12] 尤光利,侯宝生,王战备. 通信原理[M]. 北京:清华大学出版社,2012:288-289.
YOU Guang-li, HOU Bao-sheng, WANG Zhan-bei. Communication Theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2012:288-289. (in Chinese)

作者简介:



赵兴运(1988—),男,河北邢台人,2012年于空军工程大学获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为雷达成像与目标识别;

ZHAO Xing-yun was born in Xingtai, Hebei Province, in 1988. He received the B. S. degree from Air Force Engineering University in 2012. He is now a graduate student. His research concerns radar imaging and target recognition.

Email:zhaoxingyun123@126.com

张群(1964—),男,陕西合阳人,2001年于西安电子科技大学获博士学位,现为空军工程大学信息与导航学院教授、博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理与电子对抗;

ZHANG Qun was born in Heyang, Shaanxi Province, in 1964. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 2001. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include radar signal processing and electronic countermeasures.

娄昊(1984—),男,河南原阳人,2008年于国防科学与技术大学获信息与通信工程专业硕士学位,现为讲师,博士研究生,主要研究方向为雷达与通信信号处理;

LOU Hao was born in Yuanyang, Henan Province, in 1984. He received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2008. He is now a lecturer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns radar and communication signal processing.

李晓辉(1979—),女,山东临沂人,工程师,主要研究方向为雷达成像与目标识别;

LI Xiao-hui was born in Linyi, Shandong Province, in 1979. She is now an engineer. Her research interests include radar imaging and target recognition.

罗迎(1984—),男,湖南益阳人,2013年于空军工程大学获信号与信息处理专业博士学位,现为讲师,主要研究方向为雷达信号处理与目标识别。

LUO Ying was born in Yiyang, Hunan Province, in 1984. He received the Ph. D. degree from Air Force Engineering University in 2013. He is now a lecturer. His research interests include radar signal processing and target recognition.