

高功率微波应急通信系统初探^①

史迪威, 方进勇, 黄惠军

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘 要:文章针对现代战争中对强抗干扰能力应急通信系统的需求问题, 根据现代通信原理、现代通信抗干扰原理以及高功率微波信号的特点, 研究了高功率微波应急通信技术, 设计了一种抗干扰能力强的战场应急通信方案。基于高功率微波信号峰值功率高、脉冲宽度窄、脉冲重复频率低等特点, 信号的能量会集中于窄脉冲中, 将其应用于通信能有效提高通信的抗干扰能力。采用脉冲宽度调制这一适合高功率微波信号特点的方法实现高功率微波通信, 通过 simulink 仿真实验, 验证了高功率微波通信的可行性, 在此基础上采用 MATLAB 数值实验分析了高功率微波通信的抗干扰能力, 最后得到高功率微波通信的抗噪声性能曲线。结果表明, 当信噪比大于 -5dB 时, 在相同信噪比下, 高功率微波通信相比于 2ASK、2FSK 及 2PSK 可以更好地降低系统误码率, 提高通信的抗干扰能力。因此, 高功率微波应急通信技术为战场应急通信系统提供了一种新的方案, 具有重要的军事应用价值。

关键词:高功率微波; 应急通信; 抗干扰

中图分类号: V443

文献标识码: A

文章编号: 1674-7135(2018)04-0001-05

D O I: 10.3969/j.issn.1674-7135.2018.04.001

Research on High Power Microwave Emergency Communication Technology

SHI Diwei, FANG Jinyong, HUANG Huijun

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the demand for emergency communication system with strong anti-interference capability in Modern Warfare the high power microwave emergency communication technology is studied. According to the principle of modern communication, the principle of modern communication anti-jamming and the characteristics of high power microwave signals, A battlefield emergency communication scheme with strong anti-interference capability is designed. Based on the characteristics of high power microwave signal, such as high peak power, narrow pulse width and low pulse repetition rate, the energy of signal will be concentrated in narrow pulse. Applying high power microwave signal to communication can effectively improve the anti-jamming capability of communication. High power microwave communication is realized by pulse width modulation (PWM) which is suitable for the characteristics of high power microwave signals. The feasibility of high power microwave communication is verified by Simulink simulation. The anti-jamming capability of high power microwave communication is analyzed by MATLAB numerical experiment and the anti noise performance curve of high power microwave communication is obtained. The results show that when the signal to noise ratio is greater than -5dB , under the same signal to noise ratio, the high power microwave communication can lower the system error rate and improve the anti-interference ability of the communication compared to 2ASK, 2FSK and 2PSK. Therefore, high power microwave emergency communication technology provides a new solution for battlefield emergency communication system, and has important military application value.

① 收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-07-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605135)

作者简介: 史迪威(1991—), 男, 陕西咸阳人, 2014 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为空间微波技术。

E-mail: 1522671028@qq.com

Key words: High power microwave; Emergency communication; Anti-noise

0 引言

现代战争中,信息对抗越来越受到各国的重视,干扰与抗干扰的斗争也日趋激烈。众所周知,战争中若没有通信,就没有指挥,通信在战争中占着不可小觑的地位。“应急通信”是指应对突发事件的通信。在军事上,当指挥所各种常规的通信手段均被敌方干扰或摧毁、以致面临通信中断的紧急时刻,就需要用应急通信来保障最低限度的通信联络。因此,应急通信应当具有抗毁能力强、能迅速机动或开设、抗干扰能力强等特点^[1]。高功率微波信号具有峰值功率大、信号能量集中的特点,若将其用于应急通信,则可以有效提高通信的抗干扰能力和通信距离。然而,此前的高功率微波源体积庞大,非常笨重,且高功率微波信号难以调制,使得常规的调制方法不适用于高功率微波的特点^[2];同时,高功率微波信号对接收端的电磁防护能力也提出了挑战。纵观国内外文献,暂无将高功率微波应用于通信领域的公开报道。近年来,随着高功率微波源的小型化,以及高功率微波防护能力的提升,使得将高功率微波应用于应急通信成为可能^[3]。

本文根据高功率微波信号的特点,提出了一种合适的调制解调方案;简要分析了高功率微波信号应用于应急通信的优势;通过 MATLAB 仿真实验,分析了高功率微波应急通信系统的抗干扰性能。

1 高功率微波通信抗干扰原理分析

通信系统能正常工作的条件:

$$\frac{P_{ji}}{P_{si}} < M_j \quad (1)$$

式中, P_{ji} 为进入接收机的干扰功率, P_{si} 为接收机接收到的有用信号功率, M_j 为干扰容限。

系统尚能工作时,接收机允许输入最大扰信比(干扰与有用信号之比),它反映系统在干扰环境中对干扰的耐受能力。

因此,从大方向来说,可以从降低输入扰信比和提高系统干扰容限两方面来提高系统的抗干扰能力^[4]。干扰链路性能分析如图 1 所示。以扰信比表示的通信干扰方程如式(2)所示。

$$\frac{P_{ji}}{P_{si}} = \left(\frac{P_{Tj}}{P_{Ts}}\right) \left(\frac{G_{Tj}}{G_{Ts}}\right) \left(\frac{G_{Rj}}{G_{Rs}}\right) \left(\frac{L_s}{L_j}\right) \frac{1}{L_j L_i L_p} \quad (2)$$

其中, P_{Ts} 为发射信号功率, P_{Tj} 为干扰信号功率, G_{Ts} 为发信机天线增益, G_{Tj} 为干扰机天线增益, L_s 为有用信号路径损耗, L_j 为干扰信号路径损耗, G_{Rs} 为接收机接收有用信号时的天线增益, G_{Rj} 为接收机接收干扰信号时的天线增益; L_f 为干扰与信号的频域重合损耗(滤波损耗); L_t 为干扰与信号的时域重合损耗; L_p 为极化损耗。

通过式(2)看出,发射机功率的提高可以改善通信系统的抗干扰性能。而当高功率微波通信的峰值功率高于 100MW、且将能量集中在短脉冲时,可以有效提高发射信号的功率,从而提高接收机接收到有用信号的功率 P_{si} 。当采用高功率微波信号进行点对点通信时,比常规通信具有更好的抗干扰性能。

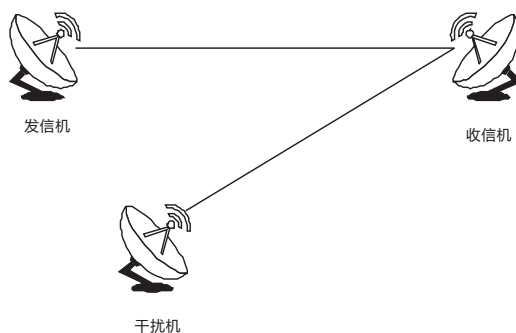


图 1 干扰链路性能分析

Fig. 1 Interference link performance analysis

因此,基于应急通信抗干扰能力的需求及高功率微波通信的特点,将两者结合应用,将会大大提高通信系统性能,具有良好的发展前景。

2 高功率微波信号的调制解调方案

2.1 高功率微波信号特点简介

高功率微波(High-Power Microwave, HPM)是强电磁脉冲的一种重要形式,具有高频、短脉冲和高峰值功率等特点。高功率微波信号的频率范围为 1GHz ~ 300GHz,峰值功率高于 100MW^[5]。目前,高功率微波的脉冲峰值功率已经达到了百兆瓦、吉瓦量级;脉冲宽度从几十纳秒量级到微秒量级;重复频率一般为几十赫兹到几百赫兹^[6]。

由于高功率微波信号的不连续性以及极低的脉

冲占空比,常规的调幅、调频、调相很难对其进行调制,因此需要一种适合于高功率微波信号特点的调制方式,以实现信息的搭载。

2.2 调制原理

根据高功率微波信号的特点,本课题采用脉冲宽度调制的方法对高功率微波信号进行调制。

脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation - PWM)即用不同的脉宽表征不同的符号,在二进制数字调制中,用两个不同的脉冲宽度代表两个二进制数字符号,即为二进制脉冲宽度调制(2PWM)。

高功率微波脉冲宽度调制的数字基带信号的符号序列可表示为^[7]:

$$e(t) = \sum_n g\left(\frac{t}{a_m} - nT_s\right) \quad (3)$$

式中, $\{a_m, 1 \leq m \leq M\}$ 表示 M 个可能的占空比; $g(t)$ 是持续时间为 T_s 的矩形脉冲;

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

则脉冲宽度调制信号可以表示为:

$$e_{PWM}(t) = \sum_n g\left(\frac{t}{a_m} - nT_s\right) \cos \omega_c t \quad (5)$$

令 A 为功率放大倍数,则高功率微波脉冲宽度调制信号为:

$$s(t) = \sqrt{A} \sum_n g\left(\frac{t}{a_m} - nT_s\right) \cos \omega_c t \quad (6)$$

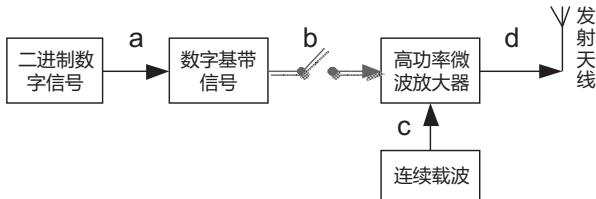


图 2 高功率微波信号调制原理图

Fig. 2 power microwave signal modulation schematic

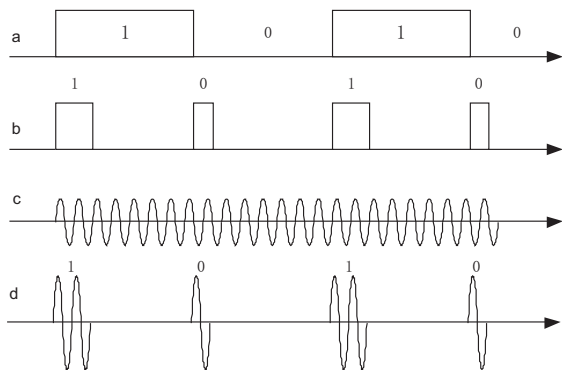


图 3 HPM 调制信号时间波形

Fig. 3 modulated signal time waveform

如图 2、图 3 所示, a 为二进制数字信号, 经过调制生成数字基带信号 b , 实现用脉冲宽度表征信息; 用信号 b 作为高功率微波功率放大器的开关控制信号, 以控制功放的状态, 当脉冲信号不为零时, 功放工作, 当脉冲信号为零时, 功放停止工作; c 为连续载波信号, 通过高功率微波功率放大器后, 生成经过脉冲宽度调制的高功率微波信号 d 。

2.3 解调原理

脉冲宽度调制有两种基本的解调方式: 非相干解调(包络检波法)和相干解调(同步检波法)。相应的原理框图如图 4 所示。

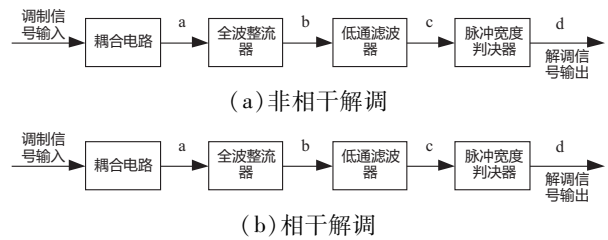


图 4 非相干解调和相干解调原理图

Fig. 4 Schematic diagram of incoherent demodulation and coherent demodulation

图 5 为高功率微波通信非相干解调过程的时间波形图, 其中, a 为接收端接收到的信号波形; 经全波整流后得到波形 b ; 通过低通滤波器后得到信号波形 c ; 对 c 进行脉冲宽度判决, 恢复出二进制数字信号 d 。

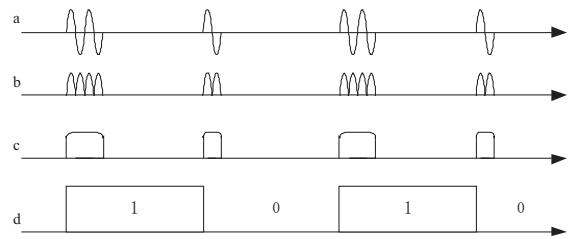


图 5 HPM 通信非相干解调过程的时间波形

Fig. 5 The time waveform of the non-coherent demodulation of high power microwave communication

3 仿真分析

基于上述的调制解调方法, 对给定的脉冲宽度和重复频率的高功率微波信号, 分析其在不同信噪比下的误码率性能。本文采用 MATLAB 仿真分析高功率微波应急通信系统的抗干扰性能。仿真实验中用高功率微波信号进行二进制数字通信, 用 500ns

的脉冲表示符号“0”; $1\mu\text{s}$ 的脉冲表示符号“1”, 重复频率为 100Hz , 脉冲幅度归一化为 1。此时, 发送的是一系列经过调制的不同脉冲宽度的窄脉冲。发送的每个符号内只有 1bit 信息, $E_b = E_s$, E_b 为每 bit 信号能量, E_s 为每个符号的信号能量。 R_b 为传信率 (每秒传输的 bit 数), R_s 为符号频率 (每秒传输的符号数), $R_b = R_s = 100\text{Hz}$, 脉冲的持续时间分别为 500ns 和 $1\mu\text{s}$, 在每个符号中的占空比为 $1/20000$ 和 $1/10000$; 采样频率 $f = 1\text{GHz}$, 给定信噪比为 E_b/N_0 , N_0 为噪声的功率谱密度。

在 Matlab 程序中, `awgn(a, SNR, 'measured')` 函数根据已知的信噪比 SNR 产生高斯白噪声干扰^[8]:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b R_b}{N_0 W} = \frac{E_s R_s}{N_0 W} \quad (7)$$

$$\text{SNR} = 101\text{g}\left(\frac{S}{N}\right) \quad (8)$$

式中, S 为信号平均功率, N 为噪声平均功率, W 为高斯白噪声带宽, 在仿真中 $W = f_s$ 。由于采样频率过高, 超出了 PC 机的内存容量, 所以, 在仿真时按比例减小带宽 $W' = f_s \times 5 \times 10^{-4} = 5 \times 10^4$, 此时每个符号内的采样点数为 $m = f'_s / R_s = 500$, 而原始信号脉冲的占空比分别为 $1/20000$ 和 $1/10000$, 在每个符号内无法用采样点表示, 提升其占空比到 $1/20$ 和 $1/10$, 此时脉冲在每个符号内可用 25 个和 50 个采样点表示, bit 信号能量提升了 10^3 倍, $E'_b = E_b \times 10^3$ 。当给定信噪比为 E_b/N_0 时, 则有

$$\frac{S'}{N'} = \frac{E'_b R_b}{N_0 W'} = \frac{E_b \times 10^3 R_b}{N_0 f_s \times 5 \times 10^{-4}} = \frac{E_b}{N_0} \times 2 \quad (9)$$

$$\text{SNR}' = 101\text{g}\left(\frac{S'}{N'}\right) = 101\text{g}\left(\frac{E_b}{N_0}\right) + 3 \quad (10)$$

由于脉冲信号的带宽为 2000Hz , 为了不发生混叠, 载波频率 $f_c \geq 2000\text{Hz}$, 数值仿真实验中, 取 $f_c = 2000\text{Hz}$ 。

在理想匹配滤波解调、判决门限取最佳值的情况下, 采用数值实验得到信噪比与误码率曲线。

图 6 所示为给定的高功率微波信号采用二进制脉冲宽度调制相干解调的方法传输信息时的信噪比误码率曲线与常规通信信噪比误码率曲线的对比图。从图中可以看到, 在小信噪比情况下, 常规信号的误码率对信噪比变化不敏感, 而高功率微波应急通信的误码率随信噪比升高而明显下降。

图 7 所示为给定的高功率微波信号采用二进制

脉冲宽度调制非相干解调的方法传输信息时的信噪比误码率曲线与常规通信信噪比误码率曲线的对比图。从图中可以看到, 当信噪比小于 -7dB 时, 高功率微波通信包络检波法的误码率性能略差于除二进制制振幅键控包络检波法以外的常规通信方式, 误码率均不随信噪比升高而明显下降; 而当信噪比大于 -7dB 后, 高功率微波通信非相干解调的误码率迅速下降; 当信噪比大于 -5dB 时, 高功率微波通信包络检波法的误码率性能优于常规通信方式。

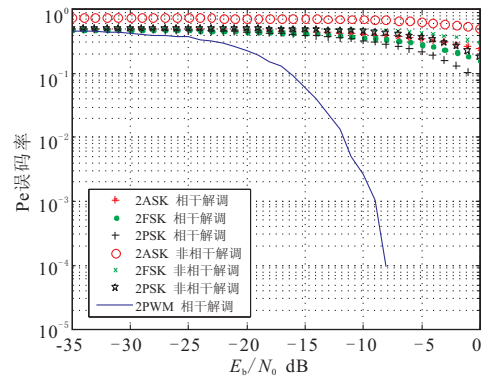


图 6 高功率微波通信同步检波信噪比误码率曲线

Fig. 6 power microwave communication synchronous detection signal to noise ratio error rate curve

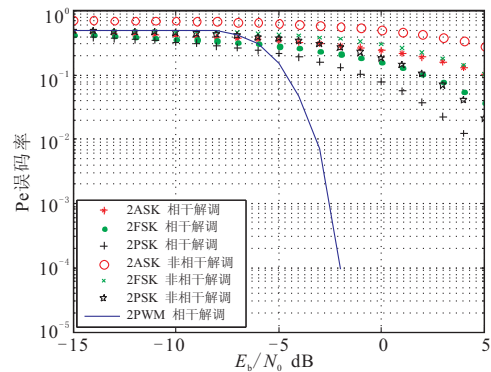


图 7 高功率微波通信包络检波信噪比误码率曲线

Fig. 7 power microwave communication envelope detection signal to noise ratio error rate curve

图 8 所示为给定的高功率微波信号采用二进制脉冲宽度调制非相干解调与相干解调的信噪比误码率曲线对比图。从图中可以看到, 相同信噪比时, 相干解调的误码率低于非相干解调的误码率, 即其抗干扰性能优于非相干解调。

总结: 通过上述仿真分析可知, 当高功率微波通信采用同步检波法时, 相同信噪比条件下, 高功率微波通信的误码率小于常规通信方式的误码率。当高

功率微波通信采用包络检波法,信噪比小于 -7dB 时,高功率微波通信包络检波法的误码率性能略差于除二进制振幅键控包络检波法以外的常规通信方式,误码率均不随信噪比升高而明显下降;当信噪比大于 -7dB 后,高功率微波通信非相干解调的误码率迅速下降;当信噪比大于 -5dB 时,相同信噪比条件下,高功率微波通信包络检波法的误码率性能优于常规通信方式。而高功率微波信号瞬时功率大的特点使得信噪比处于大信噪比状态,这就保证了高功率微波通信的抗干扰能力。

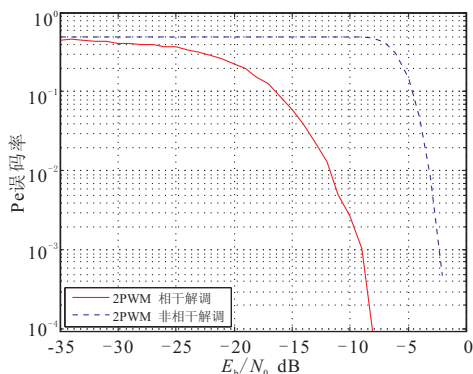


图8 同步检波与包络检波信噪比误码率曲线对比图

Fig.8 Comparison of the error rate curve between synchronous detection and envelope detection

4 结论

在公开的文献报道中,本文首次将高功率微波应用于通信领域。基于高功率微波信号的特性,提出脉冲宽度调制的方法对高功率微波信号进行调制

解调。理论分析得出通信发射信号的功率大,可以提高通信的抗干扰能力;而高功率微波信号因其脉冲窄、峰值功率大等特点,使得信号能量集中在窄脉冲上,有用信号的功率大,能够有效提高通信的抗干扰能力。仿真验证了高功率微波通信的抗噪声性能,在信噪比大于一定值的条件下,相同信噪比时,高功率微波通信的误码率小于常规通信方式。在战争中,当常规通信被干扰而无法通信时,高功率微波通信可以提供一种抗干扰能力强的通信手段,可保证重要信息的传达,具有重要的实用价值。

参考文献:

- [1] 司徒梦天. 浅谈军事应急通信系统[J]. 现代军事通信, 2003, (8):18-20.
- [2] 曾旭,冯进军. 高功率微波源的现状及其发展[J]. 真空电子技术, 2015, (2):18-27.
- [3] Bohlen H P. Advanced High-power Microwave Vacuum Electron Device Development Proceeding of 1999[C]. Particle Accelerator Conference, New York, 1999:445-449;
- [4] 杨同茂. 军事通信抗干扰技术的发展现状及趋势[J]. 通信技术, 2014(7):707-712.
- [5] Benford J, Swegle John. High power microwave[M]. Boston: Artech House, 1992.
- [6] 戴大富. 高功率微波的发展与现状[J]. 真空电子技术, 2004(5):18-24.
- [7] 张辉,曹丽娜. 现代通信原理与技术,第三版[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2013.
- [8] 陈怀琛,吴大正,高西全,等. Matlab及在电子信息课程中的应用,第三版[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.