

电孤子信号用于超宽带通信发射脉冲的研究

孙 琳, 秦文华, 赵建平

(曲阜师范大学 物理工程学院, 山东 曲阜 273165)

(zcbunny@163.com)

摘 要:介绍了孤子现象和非线性传输线路,分析了电孤子的产生和电孤子振荡器的原理。对 Toda 电路的电孤子脉冲信号及其导数函数在时域及频域做了理论推导分析,并在美国联邦通信委员会带宽和室内辐射功率限制下做了仿真验证。仿真结果表明,选择合适的参数和阶数能使电孤子振荡器产生的电孤子脉冲符合 FCC 要求,可用作超宽带通信发射脉冲。

关键词:超宽带通信;电孤子;非线性传输线

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Study of electrical soliton as transmission pulse for UWB communication

SUN Lin, QIN Wen-hua, ZHAO Jian-ping

(College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu Shandong 273165, China)

Abstract: This paper introduced soliton phenomena in nonlinear transmission line, analyzed the principle of electrical soliton and electrical soliton oscillator, and also gave a simulation experiment under the restrictions of bandwidth and emission power permitted by Federal Communications Commission (FCC). The simulation results show that the electrical soliton signal can be used as transmission pulse for UWB.

Key words: Ultra-Wide Band (UWB) communication; electrical soliton; nonlinear transmission line

0 引言

在不占用现在已拥挤不堪的频率资源的情况下,UWB 无线通信技术以其高速、宽带等优势成为无线家庭网络的主力,带来一种全新的语音和数据通信方式。

为了保证超宽带信号不对现有的无线信号造成干扰,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission,FCC)制定标准将超宽带辐射限制在非常低的水平下,并且对信号的带宽范围也有规定和要求。在这种情况下,超宽带脉冲信号的设计就成为超宽带通信中的首要问题。传统上,用于超宽带的脉冲有高频信号及其各阶导数、基于正弦波的窄脉冲和 Hermite 多项式脉冲等^[1-2]。近年来,随着非线性电路设计技术的发展,文献[3-5]已经设计出时域超短的电孤子信号振荡器。时域上的超短对应频域上的超宽,可考虑将孤子脉冲信号用于超宽带发射脉冲。

本文在分析了电孤子信号时域和频域特性的基础上,对利用电孤子信号作为超宽带发射脉冲进行了研究和仿真,探讨了电孤子信号用于超宽带通信的可行性。

1 孤子及电孤子振荡器

孤子是自然界中存在于非线性色散媒质中特有的物理现象。应用于通信领域的孤子信号是一种电压或者电流的电信号。非线性传输线路的非线性和色散性影响若能相互抵消,电路中就能存在孤子信号,可用于脉冲发生器,也可作为载波用于通信。

1.1 孤子的产生及特点

在目前的非线性领域,常研究的主要有三个非线性偏微分方程能够提供孤子解,这三个方程是 KdV 方程、Sine-

Gordon 方程和非线性 Schrodinger 方程^[6]。在电子学领域,用于描述电路孤子现象的网络主要是根据 KdV 方程搭建的电路。KdV 方程如式(1),式(1)有时也写成式(2)。

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = -3 \frac{\partial [u(t,x)]^2}{\partial x} - 3 \frac{\partial^3 u(t,x)}{\partial x^3} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = -6u(t,x) \frac{\partial u(t,x)}{\partial x} - 3 \frac{\partial^3 u(t,x)}{\partial x^3} \quad (2)$$

这里 $u(t,x)$ 就是在非线性色散媒质中传播的孤子波解,式(1)右边第一项 $-6u(t,x) \frac{\partial u(t,x)}{\partial x}$ 是传输媒质对孤子波的非线性影响,第二项 $3 \frac{\partial^3 u(t,x)}{\partial x^3}$ 是传输媒质对孤子波的色散影响。

当然,式(1)没有考虑媒质的消耗,事实上,信号在任何实际通信信道都是有衰减的,孤子在这样的非理想信道中传输应该适当地在线路中安置放大器。式(1)能够提供形式如式(3)的 1-孤子行波解。

$$u(t,x) = f(x - ct) \quad (3)$$

这里 x 表示波的位置, t 表示时间, c 是行波速度,将式(3)代入式(1)得如下方程:

$$-cf^{(1)} + 6ff^{(1)} + f^{(3)} = 0 \quad (4)$$

这里 (n) 表示函数 f 对变量 $(x - ct)$ 求 n 阶微分。解这个微分方程可得到:

$$u(t,x) = f(x - ct) = -\frac{c}{2} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{c}(x - ct + x_0)}{2} \right] \quad (5)$$

从式(5)可以看出孤子波在传输过程中有两个特点:1) 单向的传播;2) 速度与幅度相关,速度快的波幅度大,速度慢的波幅度小,在理想的非线性传输线中,信道的非线性和色散相抵消,孤子波在传输中不会改变幅度,也就不会改变速度。此外,在快波超越慢波之前,两个孤波会发生碰撞,值得注意

的是这一大一小两个孤波并不是如正弦波通过线性系统一样叠加,而是碰撞之后各自保持自己的波形继续行进^[6]。

1.2 电孤子振荡器

电孤子信号的产生和传输依赖于非线性传输线。现在大部分文献的做法是用一个非线性电路去模拟 Toda lattice,而 Toda Lattice 是 KdV 方程的一个物理模型^[6]。这样,非线性传输线中产生和传输的信号就是 KdV 方程的孤子解。图 1 (a)、(b)所示为 Toda Lattice 质点-弹簧系统及其等效电路模型,也即是 KdV 孤子解所依赖的非线性传输线模型。图 1 (b)中元件参数是单位长度 dx 值,其中 L 是线性的, $C(v)$ 是非线性的。该非线性传输线路的非线性是由可变电容 $C(v)$ 引起的,色散是由非线性传输线的周期结构产生的。

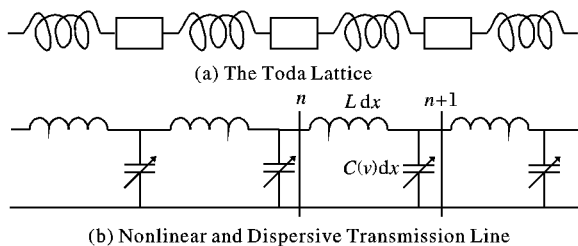


图 1 Toda Lattice 及其等效电路模型

到目前为止,还没有应用于实际的长非线性传输线,这就限制了电孤子作为载波在通信上的应用。但是在微波领域,特别是在高速振荡上却成为一个研究热点,具有广阔的应用前景。电孤子振荡器的基本结构原理如图 2 所示^[3]。用一段非线性传输线接到运放的输入输出端组成环路,通过设计运放的特性曲线,在该运放的输出端就会有电孤子脉冲序列输出。该电孤子振荡器的特点是没有外加的高频输入,振荡器的初始化是由运放放大背景噪声完成的。并且,该电孤子振荡器可以借鉴激光器脉冲中的锁模技术,设计锁模电路,可以产生不同周期的孤子脉冲序列。

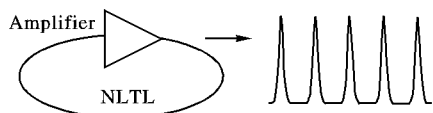


图 2 电孤子振荡器原理

文献[3]设计的孤子振荡器的除了非线性传输线之外,另一个核心部件就是运放。该运放采用可饱和吸收技术,运用自适应偏置控制方法,在启动到稳定的过程中动态地控制运放的放大增益。当加电启动时,运放处于高放大增益状态,这时候背景噪声小信号得以放大,当系统趋于稳定时,运放被控制在低增益状态,这时候不至于输出幅度达到饱和。本文讨论的电孤子信号就是由根据 Toda Lattice 网络搭建的非线性传输线中存在的孤子行波解。

2 UWB 信号的定义及其设计要求

2.1 UWB 定义及 FCC 限制

按照美国联邦通信委员会 (FCC) 在 2002 年 2 月 14 日的规定^[7],超宽带信号被定义为相对带宽(即信号带宽与其中心频率之比)大于 0.20,即

$$\text{相对带宽} = \frac{f_H - f_L}{f_c} = \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} > 20\% \quad (6)$$

或者总带宽为 500 MHz。式(6)中, f_H , f_L , 分别是功率较峰值功率下降 10 dB 时所对应的高端频率和低端频率, f_c 为

载波频率或中心频率,这里 UWB 信号带宽不同于通常所定义的 3 dB 带宽。事实上,目前被称作“超宽带”系统的带宽并不一定都是 20%,美国国防高级研究计划署对超宽带特征的定义是相对带宽大于 25%。

由于 UWB 通信技术是一种以发射冲激脉冲为基础、采用纳秒级的脉冲直接进行基带信号传输的无载波通信方式,其发射端所发射脉冲的持续时间极短,因此 UWB 信号的频谱非常宽,通常可以占用几个 GHz。正因为 UWB 信号占用的频带相当宽,它的发射无疑会对与其共用同一频段的其他现存无线通信系统产生干扰。同时,这些现存的窄带通信系统也必定会对 UWB 系统产生信号干扰,因此为了避免发射的 UWB 信号对现存的窄带通信系统,尤其是 GPS 系统造成太大的干扰,FCC 对 UWB 通信技术在其开放频段 3.1 ~ 10.6 GHz 内的信号发射功率作了严格规定。根据“FCC Part15”的规定,对于室内的 UWB 无线通信设备,UWB 信号辐射的平均功率在测量带宽分辨率为 1MHz 时必须满足:960 ~ 1 610 MHz 时,辐射的平均功率(EIRP)为 -75.3 dBm;1 610 ~ 1 990 MHz 时,EIRP 为 -53.3 dBm;1 990 ~ 3 100 MHz 时,EIRP 为 -51.3 dBm;3 100 ~ 10 600 MHz 时,EIRP 为 -41.3 dBm;高于 10 600 MHz 时,EIRI 为 -51.3 dBm。

2.2 UWB 波形设计要求

超宽带无线通信的第一步是产生时域上的超短信号用作发射脉冲。根据超宽带通信的技术特点和美国 FCC 的规定,这种信号必须是时域上极短脉冲形式,频域上在 3.1 ~ 10.6 GHz 的 7 500 MHz 带宽范围内。为了满足 UWB 辐射器的设计,必须保证最大发射水平 -20 dB 间的发射带宽在 UWB 频带内。在最大发射水平 -10 dB 间的最小带宽是 500 MHz。UWB 波段内 UWB 信号的最大允许发射输出要设在 -43.1 dBm/MHz。此外,为了保证能量的有效辐射,对于脉冲 $p(t)$ 需满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(t) dt = 0 \quad (7)$$

即要求发射脉冲的直流分量为零。

3 电孤子信号用于超宽带脉冲的分析

由图 2 所示的电孤子振荡器输出的孤子脉冲序列的数学表达式较为复杂,为了简化分析,不妨取单个电孤子行波在某固定点的时间函数^[8],

$$f(t) = \alpha \beta^2 \text{sech}^2(\beta t) \quad (8)$$

这里 α 是调节系数,用于控制电孤子信号的能量。借鉴高斯及其各阶导数用于超宽带脉冲,本文也考虑了孤子脉冲的各阶导数。图 3 所示是孤子脉冲及其 1~7 阶导数的时域波形。图 4 所示为孤子脉冲及其 1~7 阶导数的单边能量谱密度。

从图 3 中可明显看出孤子信号及其偶数阶导数是偶函数,关于时间轴对称,其奇数阶导数是奇函数,关于原点对称。也就是奇数阶孤子导数满足式(7)。从图 3 还可以看出随着微分阶数的增加,信号能量越来越向高频集中。这两点恰好满足信号没有直流分量,能量主要集中在高频的要求,便于信号的辐射。除此外,FCC 对超宽带通信开放的频段是 3.1 ~ 10.6 GHz,理想情况下的中心频率为 6.85 GHz。因此,通过选择合适的参数和微分阶数,可选用孤子信号的奇数阶导数作为发射脉冲。

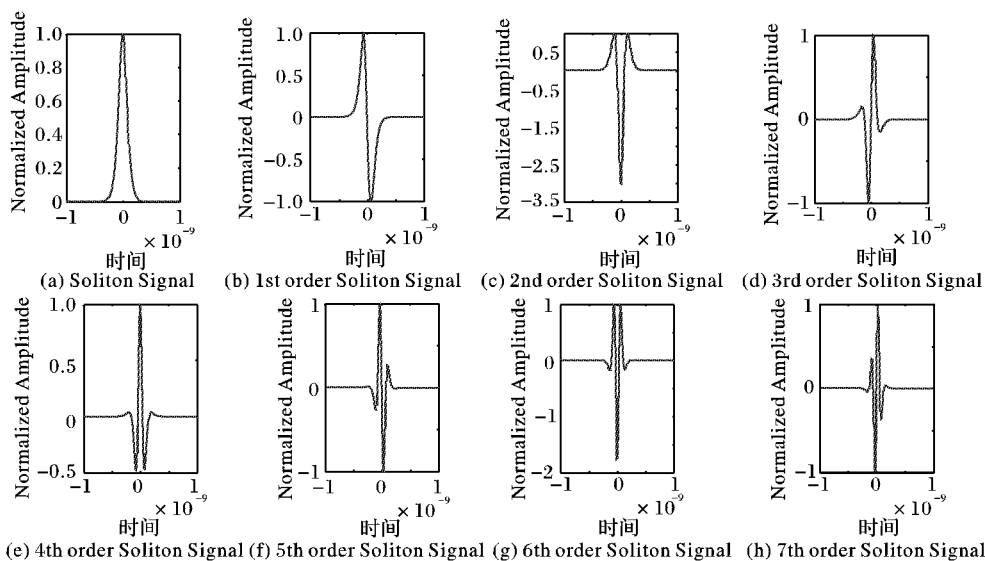


图3 孤子及其1~7阶导数时域波形

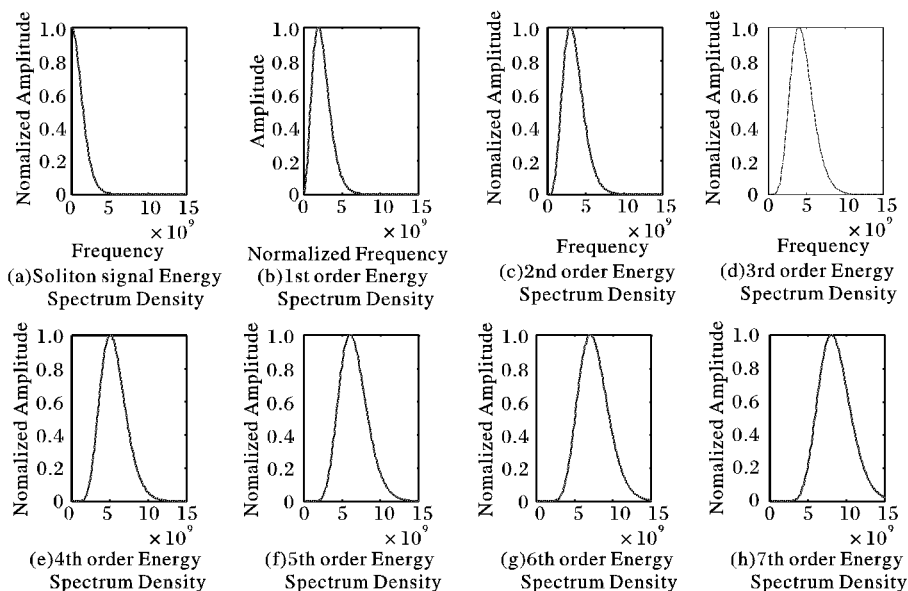


图4 孤子及其1~7阶导数能量谱

若对 UWB 信号进行线性调制(如 PAM 或 BPSK 调制), 则经发射天线作用后的输出波形为^[9]:

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k f^{(n)}(t - kT) \quad (9)$$

其中 $f^{(n)}(t)$ 是发射波形, T 为脉冲重复周期, 序列 $\{a_k\}$ 为信息符号。根据文献[10], $y(t)$ 的功率谱密度 PSD 可表示为:

$$P_n(f) = \frac{\sigma_a^2}{T} |F_n(f)|^2 + \frac{u_a^2}{T^2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left| F_n\left(\frac{k}{T}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T}\right) \quad (10)$$

其中 $F_n(f)$ 是孤子信号 n 阶导数的傅里叶变换, σ_a^2, u_a^2 分别为序列 $\{a_k\}$ 的方差和均值。从式(10)可以看出信号的功率谱密度有两部分组成。第一项是连续谱, 形状取决于信号脉冲的频谱特性, 即取决于信号波形的频谱相应。第二项由频谱间隔为 $1/T$ 的离散频率分量组成, 每一根谱线功率都与在 $f = k/T$ 的 $|F_n(f)|^2$ 值成正比。如果信息符号具用零均值, 即 $u_a = 0$, 离散频率分量将消失。当信息符号是随机的、等可能出现的且在复平面上的位置对称时, 以上条件即可得到满足。如果对信息符号 $\{a_k\}$ 取 $\{+1, -1\}$, 且是等概率出现的, 则从理论上讲, 其均值 $u_a = 0$, 方差 $\sigma_a^2 = 1$, 所以传输信号的功

率谱密度为 $P_n(f) = \frac{1}{T} |F_n(f)|^2$ 。根据以上分析, 在此种理想情况下孤子脉冲及其1~7阶导数的功率谱密度如图5所示。

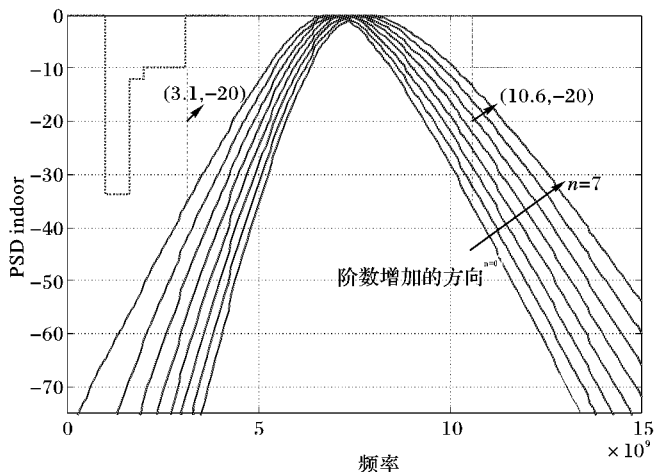


图5 孤子脉冲及其1~7阶导数的功率谱密度

由图5可明显看出, 在 -10dB 的带宽都远大于 500MB ,

(下转第1900页)

的节点响应请求。查询到D区后,D区的路由节点即节点15转发请求,收集区域内的光照信息,收集到的数据如图4所示,分别为:(D,81)、(D,78)、(D,81)、(D,75)、(D,83)、(D,76)。路由节点15进行本地数据融合,得到 $\text{MIN}(\text{Light}) = 76$,接着将查询结果(D,76)发送到汇聚节点。从这个简单的例子可以看出,一次查询如果不经数据融合,射频发送的次数为46次;但是本地数据融合以后,射频发送的次数为7次。这将有助于降低功耗,提高网络生存期。通过数据融合,汇集节点通信压力大大减轻。温室环境软件监控画面如图9所示。

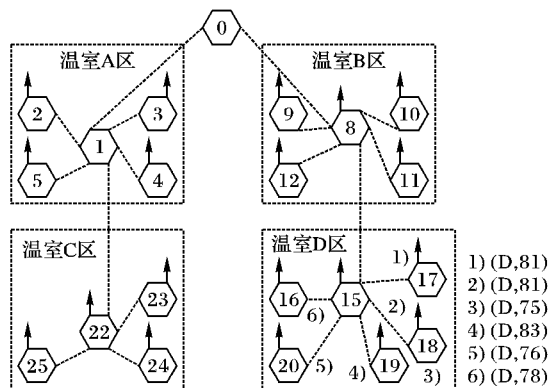


图8 温室环境 ZigBee 监控网络结构



图9 温室环境软件监控画面

数据融合利用节点的分布式计算能力,对数据做了初步处理,去掉了数据冗余,降低了网关的通信压力。如果原始数据直接转发给网关,网关做所有的数据处理,它的性能将很大

程度上影响系统的性能,网关上软件监控软件的设计复杂度也会增加。

5 结语

使用两层的数据融合算法,有利于降低 ZigBee 网络的信息冗余度,网络中信息量的减少对网络的好处是显而易见的,可以减少节点信息重发的次数,节省网络有限的能量,提高信息准确度,延长网络的生存期。但是有一些问题也需要注意,如果数据融合算法过于复杂,会给网络带来一些性能损失,如网络时延,实时性恶化,路由节点计算压力过大而导致网络效率降低等。另外数据融合的应用相关性是比较强的,需要效率和复杂度上做一个权衡,由具体应用决定使用何种数据融合方式。

参考文献:

- [1] 李燕君,王智资.资源受限的无线传感器网络基于衰减信道的决策融合[J].软件学报,2007,18(5):1130-1137.
- [2] 汪祥莉,李腊元,王文波.无线传感器网络中的路由协议研究[J].计算机科学,2008,35(07):50-53.
- [3] COLLETT M A, COX M G, DUTA M, *et al.* The application of self-validation to wireless sensor networks[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(12): 125-201.
- [4] ZHU Y W, ZHONG X X, SHI J F. The design of wireless sensor network system based on Zigbee technology for greenhouse[J]. Journal of Physics, 2006, 48(1): 1195-1199.
- [5] 成小良,邓志东.基于 ZigBee 规范构建大规模无线传感器网络[J].通信学报,2008,29(11):158-164.
- [6] 仇国庆,杨志龙,杨莉,等.基于 ZigBee 协议的无线传感器网络节点设计[J].自动化与仪器仪表,2008(3):7-8.
- [7] 雷听,鄢楚平,徐海川.无线传感器网络数据融合技术的研究与仿真[J].计算机工程与设计,2008,29(18):4669-4671.
- [8] MENG JOO ER, CHEN WEILONG, WU SHIQIAN. High-speed face recognition based on discrete cosine transform and RBF neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(3): 679-691.
- [9] 刘玲,王耀南,况菲,等.基于神经网络和遗传算法的机器人路径规划[J].计算机应用研究,2007,24(2):264-265.

(上接第1879页)

在-20 dBm处,由0~4阶5条曲线的带宽在FCC允许的3.1~10.6 GHz范围内。以上分析及仿真可以发现,只要改变参数,总能在孤子脉冲的奇数阶导数中找到符合FCC规定的UWB脉冲信号。因此,在超宽带通信中可以选择电孤子信号的奇数阶导数作为发射脉冲。

4 结语

本文对电孤子脉冲信号用于超宽带发射脉冲进行了理论分析,并在FCC的要求和规范下,在带宽范围和发射功率限制方面做了数值仿真验证。仿真结果表明电孤子脉冲信号序列的时域超短对于频域的超宽,通过调节参数,可以用作超宽带无线通信系统的发射信号。

参考文献:

- [1] 葛利嘉,曾凡鑫,刘郁林,等.超宽带无线通信[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [2] SIWIAK K, McKEOWN D. Ultra-Wideband Radio Technology[M]. 张中兆,沙学军,译.北京:电子工业出版社,2005.
- [3] HAM D, LI XIAOFENG, DENENBERG S A, *et al.* Ordered and

chaotic electrical solitons: Communication perspectives[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(12): 126-135.

- [4] RICKETTS D S, LI XIAOFENG, HAM D. Electrical soliton oscillator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(1): 373-382.
- [5] RICKETTS D S, LI XIAOFENG, SUN NAN, *et al.* On the self-generation of electrical soliton pulses[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2007, 42(8): 1657-1668.
- [6] REMOISENET M. Waves called solitons: concepts and experiments[M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [7] ET Docket 98-153. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems[S], 2002.
- [8] SINGER A C. Signal Processing and communication with solitons[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [9] 陆曼琪.超宽带(UWB)无线通信系统的分析与研究[D].上海:上海大学,2005.
- [10] PROAKIS J G. Digital Communications[M]. 张力军,译.4版.北京:电子工业出版社,2003.
- [11] YANG LIUQING, GIANNAKIS G B. Ultra-wideband communications: An idea whose time has come[J]. Signal Processing Magazine, 2004, 21(6): 26-54.