

电磁信号时间反演的实现方法研究进展

丁 帅, 王秉中, 欧海燕, 赵德双

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】讨论了基于数字信号处理技术和模拟信号处理技术实现时域电磁信号时间反演的两类方法。前者可以直接对时域信号进行采样处理或通过频域中进行相位共轭变换, 实现时域信号时间反演; 后者基于时域成像原理实现时域电磁信号的时间反演处理, 包括微波光子技术和全电子技术两种方案。

关键词 进展; 电磁信号; 实现; 时间反演

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.05.015

Advances on the Research of Implementation Methods for Time Reversal of Electromagnetic Signals

DING Shuai, WANG Bing-zhong, OU Hai-yan, and ZHAO De-shuang

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Two kinds of methods for implementing time reversal of electromagnetic signals in time domain based on digital signal processing and analog signal processing are introduced and discussed. The former technique can directly sample and process time domain signal, or use phase conjugation in frequency domain, to implementing time reversal of electromagnetic signals; while the other technique is based on the principle of temporal-imaging to implement time reversal of electromagnetic signals in time domain, including two schemes of microwave photonics technology and fully electronic technology.

Key words advance; electromagnetic signal; implementation; time reversal

时间反演(time reversal)并不是时间倒流, 而是运动的反演, 就好比将电影胶片倒放所产生的效果。文献[1]研究了声学时间反演镜, 能使在均匀和非均匀媒质中传播的声波实现时间和空间的同步聚焦, 因此可用于复杂媒质中目标的探测^[2-5]。

2004年, 时间反演技术被引入到电磁学领域, 人们开始探索时间反演技术在电磁波系统中的应用。研究发现, 利用时间反演技术同样可以实现电磁波的时间和空间同步聚焦。因此, 可用于复杂媒质中目标的探测与成像、超宽带无线通信等领域^[6-11]。文献[12]推导给出了电磁波的时间反演腔理论; 文献[13]验证了时间反演电磁波在近场具有超分辨率聚焦特性; 文献[14]用实验证明了时间反演电磁波具有远场超分辨率聚焦特性。虽然近年来对电磁波时间反演的研究有了较大进展, 但该技术却仍然未能走出实验室, 进入实用, 其根本原因是高效、高性能的电磁信号时间反演尚难以实现。

在时间反演电磁波系统中, 电磁信号的时间反演是由时间反演阵列来完成的, 包含天线和信号处理两个单元。天线用于接收来波和发射时间反演信号; 信号处理单元实现对来波信号的时间反演。

电磁信号的时间反演实现方式可分为两类:

1) 基于数字信号处理技术; 2) 基于模拟信号处理技术。前者可以直接对时域信号进行采样处理或通过频域相位共轭, 实现时域信号时间反演; 而后者是基于时域成像原理实现时间反演处理, 包括微波光子技术和全电子技术两种方案。文献[15]对时间反演与负折射材料的相关性作过论述, 但并没有真正设计出具有时间反演特性的电磁材料。

1 基于数字信号处理技术的电磁信号时间反演实现方法

直接在时域进行电磁信号时间反演的流程如图1所示。

收稿日期: 2010-08-13; 修回日期: 2011-05-11

基金项目: 国家863计划(2008AA01Z206); 中央高校基本科研业务费项目(E022050205,ZYGX2010J043)

作者简介: 丁 帅(1982-), 男, 博士生, 主要从事时间反演电磁学方面的研究。



图1 直接时域数字信号处理流程

受ADC器件采样速率的限制,直接时域数字信号处理目前只用于低频信号,如在声学/超声时间反演系统中,对微波频段的电磁波时间反演系统的实现还很困难。在有关电磁波时间反演研究的报道中,反演信号的产生均采用高档仪器实现,如高端任意波形发生器(AWG)、高端示波器(DSA)^[16]等。该方式成本高,难以走出实验室进入应用。文献[14]将基带信号反演,然后将反演后的信号调制到2.45 GHz的载波上,从而实现较高中心频率电磁脉冲,它是时间反演。利用频谱搬移的方法虽然能够提高处理信号的频率,但所处理的基带信号通常频带较窄,无法实现宽带时域信号反演。

信号在时域的反演变换等同于在频域对其每个频率分量做相位共轭变换^[16-18]。因此,通过傅里叶变换将时域信号变换至频域,在频域对信号做相位共轭处理,再通过傅里叶逆变换便可得到时间反演信号。图2所示为通过相位共轭变换得到时间反演信号的流程。

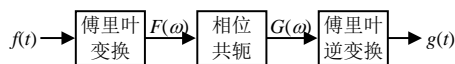


图2 相位共轭方法得到时间反演变换信号

单频信号的相位共轭可以通过混频实现。假设射频信号的表达式为:

$$f_{\text{RF}} = \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

若本振信号为:

$$f_{\text{LO}} = 2\cos(2\omega t) \quad (2)$$

混频后得到的信号为:

$$f_{\text{IF}} = \cos(\omega t - \varphi) + \cos(3\omega t + \varphi) \quad (3)$$

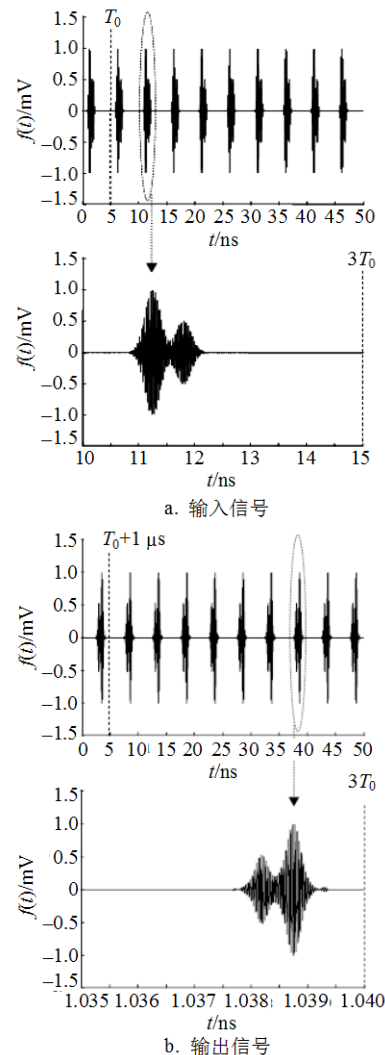
经过低通滤波后得到输出信号:

$$f = \cos(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

可以看到,输出信号与射频信号相位共轭。单频信号的相位共轭早已用于方向回溯天线系统^[19]。

文献[20]利用相位共轭技术实现了周期性宽带电磁信号的时间反演。该系统包括4个模块:1)傅里叶变换电路,其作用是将一个周期时域信号变换为离散频域信号,通过不同本振信号与RF信号混频,实现对时域周期信号的傅里叶级数展开;2)相位共轭电路,对各个离散频率分量作相位共轭处理;3)傅里叶逆变换电路,对相位共轭信号做傅里叶逆变换,获得时域的时间反演信号;4)包络检波电路,提供时隙信号,通过一个周期为 T_c 的时钟信号进行

协调,控制DSP处理进程。图3为对一个周期信号进行时间反演的处理结果。该方法实现了周期性宽带电磁信号的时间反演,并初步用于电磁波时间反演系统实验^[21]。

图3 周期信号时间反演处理^[20]

文献[20-21]中基于相位共轭技术实现的周期性宽带电磁信号时间反演存在局限性。1) 该方式不能处理一般的非周期信号;2) 用DSP做相位共轭处理实时性较差;3) 外加本振频率源会限制系统工作频段。因此,该实现方式仍需大力改进。

上述基于数字信号处理技术实现电磁信号时间反演的方法,无论是直接在时域进行还是在变换域进行,都需要进一步开展深入的探索研究,以提高数字信号处理效率。探讨信号时间反演在新的变换域的形式及实现方式,是基于数字信号处理技术实现高效电磁信号时间反演的途径之一。

压缩感知(compressed sensing)理论是近期提出的一种先进的信号处理理论^[22],它能够突破奈奎斯

特采样定律, 在压缩采样的情况下, 无失真地恢复信号。利用该方法实现对超宽带时域电磁信号采样及信号重构已经有相关的文献报道^[23]。将压缩感知理论与技术应用于电磁信号时间反演, 提高处理效率, 是需进一步努力探索的研究方向。

2 基于模拟信号处理技术的电磁信号时间反演实现方法

基于模拟信号处理技术实现电磁信号时间反演的方法在速度、带宽等方面优于数字信号处理技术, 它不需要对信号进行数字化取样, 而是基于时域成像(temporal-imaging)原理。

基于色散补偿原理的微波光子波形变换方法是一种能够实现宽带微波信号时间反演的模拟信号处理技术。文献[24]根据色散补偿原理, 利用微波光子技术, 实现了射频信号时间反演, 图4为反演过程示意图。掺饵光纤激光器发出的超短光脉冲在负色散光纤中传输发生色散, 总色散为 D_1L_1 , D_1 为光纤色散系数, L_1 为光纤长度。输入射频信号会对产生的啁啾光脉进行强度调制。在色散系灵敏为 D_2 的正色散光纤模块中, 正色散会对负色散啁啾脉冲进行补偿, 波形会被压缩, 得到图4中标号为(I)所示的波形。当第二段光纤的色散绝对值为 D_1L_1 时, 波形在时间轴上会达到最大压缩, 得到图4中标号为(II)所示的波形。进一步加大正色散补偿会使光脉冲变成正啁啾脉冲, 其包络波形会在时间轴上反转, 得到图4中标号为(III)所示的波形。当 $D_2L_2=-2D_1L_1$ 时, 输出包络信号波形(IV)便为输入射频信号的时间反演波形。如果再进一步增加色散, 会使反演波形在时间轴上被拉伸, 如图4中标号为(V)的波形。

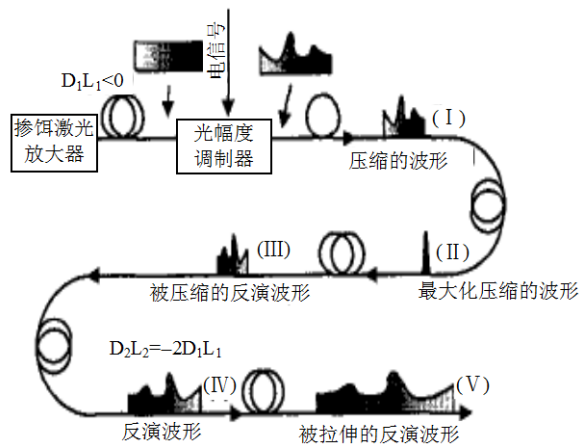


图4 基于微波光子技术的射频信号时间反演变换过程^[24]

文献[25]提出了时间透镜的概念。文献[26]基于麦克斯韦方程的波动方程, 展示了优美的时-空对偶

特性, 即空域中波束的近轴衍射问题和时域窄带脉冲在色散媒质中的传播问题满足形式相同的复扩散方程; 时域中与时间平方成正比的相位调制对应于空域中与波束径向距离平方成正比的相位调制, 由此定义出与空间薄透镜对偶的“时间透镜”; 进一步引申出时域成像概念。

时域窄带电磁脉冲在色散媒质中传播满足方程:

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \frac{i}{2} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} \quad (5)$$

式中, i 为虚部; A 为脉冲幅度; β 为传播常数; ω 为角频率; ξ 为传播距离; τ 为时间。

电磁波傍轴衍射问题则满足方程:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

式中, E 为电场强度; k 为波数; x, y, z 为空间变量。比较式(5)与式(6), 可以看出, 两者都具有复扩散方程的形式, 并存在以下对偶关系:

$$i \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \Leftrightarrow -\frac{i}{2k} \quad \xi \Leftrightarrow z, \quad \tau \Leftrightarrow x, y \quad (7)$$

因此, 与波在空间传播相似, 可写出波的时间传递函数:

$$H(t) = \exp(-i \frac{\omega_0}{2f_T} t^2) \quad (8)$$

式中, f_T 为时域聚焦长度(temporal focal length), 简称“焦时”(focal time), 对应于空域透镜的“焦距”。与空域聚焦相似, 电磁信号在时间上也会聚焦, 并且存在聚焦极限。即信号在时间轴上不能无限压缩。当波形压缩达到极限时, 如果继续对其进行压缩处理, 波形便会在时间轴上发生反转, 这正是信号时间反演所要的效果。因此, 时域成像原理为电磁信号时间反演的实现提供了新的途径。

空间透镜成像问题中, 像大小的变换尺度为:

$$M = -\frac{d_i}{d} \quad (9)$$

式中, d 为物距; d_i 为像距; 像的变换尺度与物、像在透镜前后的距离相关。与之对偶的时间透镜成像问题中, 波形变换尺度则与信号到达时间透镜前及经过时间透镜后的色散量相关, 表示为:

$$M_T = -\xi_2 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} / \xi_1 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \quad (10)$$

当信号到达时间透镜前的色散量与离开时间透镜后的色散量相同时, 电磁波波形实现时间反演。

目前, 基于时域成像原理实现电磁信号时间反演的方案主要有微波光子技术和全电子技术两种。

对微波系统采用微波光子技术的电磁信号时间反演方案具有很高的系统时间-带宽乘积、高分辨率以及很容易实现所需带宽等优点。但是,从系统集成的角度看,它必须采用电光/光电转换器件和比较昂贵的激光源。

文献[27]用基于时域成像原理提出了采用全电子(fully electronic)系统的电磁信号时间反演实现方案。相比上述方法,全电子技术方案成本低、易集成,是实现高效时间反演阵列的有效途径。在今后全电子技术实现电磁信号时间反演的研究中,应更多关注提高系统带宽与可靠性、损耗降低、关键器件小型化的研究。

图5为基于全电子技术的射频信号时间压缩变

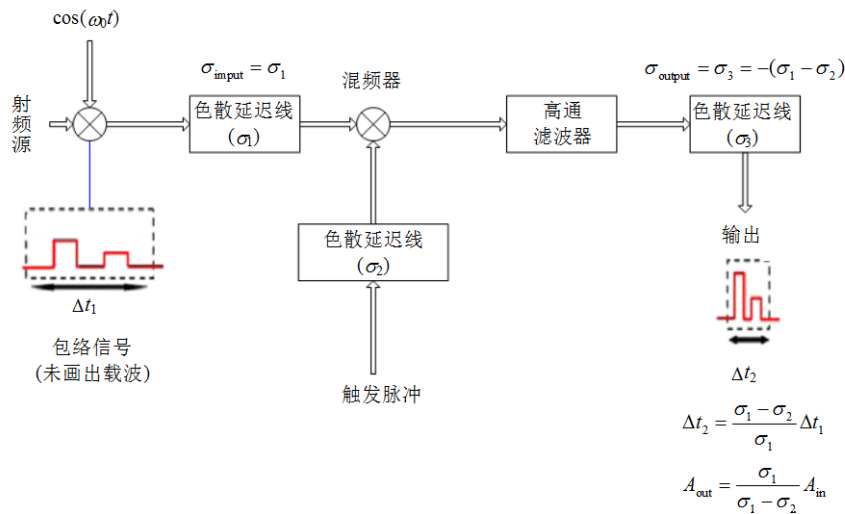


图5 基于全电子技术的射频信号时间压缩变换过程

在全电子技术实现方案中,产生啁啾脉冲的色散器件可由啁啾电磁禁带结构^[28-29](chirped electromagnetic bandgap (CEBG) structure)实现。波形变换尺度也要依靠CEBG结构的群时延斜率进行调节。图6所示为一种啁啾电磁禁带结构^[28],然而该结构需要通过增加长度来获得更大的带宽以及更高的群时延斜率。进一步探索研究宽频带、低损耗、小型化的高性能微波啁啾器件是基于全电子技术实现电磁信号时间反演的关键点之一。

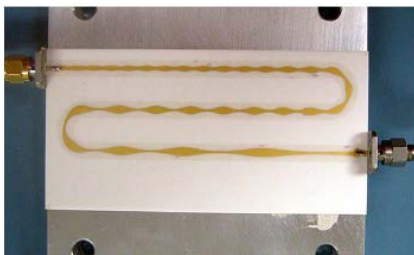


图6 一种啁啾电磁禁带结构^[28]

理论上,可采用高频载波使输入信号包络更加清晰,从而提高系统分辨率。但载波频率过高,在

换过程^[27]。一个长度为 Δt_1 的时域脉冲RF信号(图中未显示载波)先通过一个群时延斜率为 σ_1 的色散器件形成啁啾脉冲,然后和由短时脉冲经过群时延斜率为 σ_2 的色散器件处理的啁啾脉冲一起送入宽带模拟乘法器,产生平方相位调制,调制后的信号经过群时延斜率为 σ_3 的色散器件处理,可得输出RF信号,其长度为 $\Delta t_2 = (-\sigma_3 / \sigma_1) \Delta t_1$ 。记 $M = -\sigma_3 / \sigma_1$,如果 $|M| > 1$,时域波形被拉伸;如果 $|M| < 1$,时域波形被压缩;如果 $M < 0$,时域波形被反转。输出波形与输入波形的幅度满足关系式 $A_{\text{out}} = |\sigma_1 / \sigma_3| / A_{\text{in}}$ 。因此,恰当选择 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ,使 $M = -1$,可以实现对输入时域波形的时间反演。

包络检测过程中信号的高频分量损耗会增大,引起信号波形失真,降低系统可靠性,故需要通过提高信号包络检测灵敏度来进一步改善基于全电子技术实现电磁信号时间反演系统的可靠性。

电磁信号时间反演全电子方案设计中,还应权衡系统时隙与系统带宽之间的矛盾^[30]。系统时隙会受到触发脉冲(trigger impulse)脉宽与产生啁啾脉冲的CEBG结构的限制。可以通过增加色散量来提高系统分辨率,但会降低啁啾率,限制系统带宽。尽管系统带宽可以通过减少色散量来提高,但必然又会以牺牲系统时隙为代价。因此,在系统方案设计中,应充分考虑两者的矛盾,提出合理的系统时隙-带宽乘积指标。

综上所述,基于模拟信号处理技术实现电磁信号时间反演的方法同样存在进一步改进的空间。

3 结束语

时间反演电磁学在超宽带电磁波通信、雷达探

测与成像等领域中具有广阔的应用前景, 可靠迅捷的电磁信号时间反演是实现时间反演电磁波系统的关键。本文对电磁信号时间反演的实现方法进行了综述, 指出了未来的探索研究重点。相信随着相关基础理论研究的不断深入、关键技术的不断突破, 基于时间反演的、具有独特优势的新型电磁波应用系统将会最终走出实验室, 投入实际应用。

参 考 文 献

- [1] FINK M, PRADA C, WU F, et al. Self focusing in inhomogeneous media with 'time reversal' acoustic mirror[C]//Proceedings IEEE 1989 Ultrasonics Symposium. Montreal, Canada: IEEE, 1989.
- [2] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields-part I: basic principles[J]. IEEE Trans Ultras, Ferr, Freq Contr, 1992, 39(5): 555-566.
- [3] WU F, THOMAS J L, FINK M. Time reversal of ultrasonic fields-part II: experimental results[J]. IEEE Trans Ultras, Ferr, Freq Contr, 1992, 39(5): 567-578.
- [4] CASSEREAU D, FINK M. Time reversal of ultrasonic fields-part III: theory of the closed time-reversal cavity[J]. IEEE Trans Ultras, Ferr, Freq Contr, 1992, 39(5): 579-592.
- [5] DE ROSNY J, FINK M. Overcoming the diffraction limit in wave physics using a time-reversal mirror and a novel acoustic sink[J]. Phy Rev Lett, 2002, 89(12): 1-4.
- [6] KYRITSI P, PAPANICOLAOU G, EGGERS P, et al. MISO time reversal and delay-spread compression for FWA channels at 5 GHz[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Letters, 2004, (3): 96-99.
- [7] STROHMER T, EMAMM I, HANSEN J, et al. Application of time-reversal with MMSE equalizer to UWB communications[C]//IEEE 2004 Global Telecommunications Conference. [S.l.]: IEEE, 2004.
- [8] QIU R C, ZHOU C, GUO N, et al. Time reversal with MISO for ultrawideband communications: experimental results[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, (5): 269-273.
- [9] CANDY J V, CHAMBERS D H, GUIDRY B L, et al. Multi-channel time-reversal receivers for multi and 1-bit implementations: US, 7463690[P]. 2008.
- [10] KOSMAS P, RAPPAPORT C M. Time reversal with the FDTD method for microwave breast cancer detection[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2005, 53: 2317-2323.
- [11] LIU D H, KANG G, LI L, et al. Electromagnetic time-reversal imaging of a target in a cluttered environment[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2005, 53: 3058-3066.
- [12] CARMINATI R, PIERRAT R, DE ROSNY J, et al. Theory of the time reversal cavity for electromagnetic fields[J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3107-3109.
- [13] DE ROSNY J, FINK M. Focusing properties of near-field time reversal[J]. Phys Rev A, 2007, 76(6): 065801:1-4.
- [14] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal[J]. Science, 2007, 315(5815): 1120-1122.
- [15] PENDRY J B. Time reversal and negative refraction[J]. Science, 2008, 322(5898): 71-73.
- [16] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Time reversal of wideband microwaves[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88 (154101): 1-3.
- [17] FANNAJIANG A C. On time reversal mirrors[J]. Inverse Problems, 2009, 25(9): 095010-095029.
- [18] JACKSON D R, DOWLING D R. Phase conjugation in underwater acoustics[J]. J Acoust Soc Am, 1991, 89(1): 171-175.
- [19] PON C. Retrodirective array using the heterodyne technique[J]. IEEE, Transactions on Antennas and Propagation, 1964, 12(2): 176-180.
- [20] SHA S, SHENOYA V K, JUNG S, et al. A hardware architecture for time reversal of short impulses based on frequency domain approach[C]//Proc of SPIE, [S.l.]:[s.n.], 2009.
- [21] ZHAI H, SHA S, SHENOY V K, et al. An electronic circuit system for time-reversal of ultra-wideband short impulses based on frequency-domain approach[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(1): 74-86.
- [22] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2006, 52(4): 289-1306.
- [23] SHI G, LIN J, CHEN X, et al. UWB echo signal detection with ultra-low rate sampling based on compressed sensing[J]. IEEE Trans Circuits and Systems II: Express Briefs, 2008, 55(4): 379-383.
- [24] COPPINGER F, BHUSHAN A S, JALALI B. Time reversal of broadband microwave signals[J]. Electronics Letters, 1999, 35(15): 1230-1232.
- [25] KOLNER B H, NAZARATHY M. Temporal imaging with a time lens[J]. Optics Letters, 1989, 14(12): 630-632.
- [26] KOLNER B H. Space-time duality and the theory of temporal imaging[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1994, 30(8): 1951-1963.
- [27] SCHWARTZ J D, AZANA J, PLANT D V. An electronic temporal imaging system for compression and reversal of arbitrary UWB waveforms[C]//IEEE 2008 Radio and Wireless Symposium. Orlando, FL: IEEE, 2008.
- [28] SCHWARTZ J D, AZANA J, PLANT D V. A full electronic system for the time magnification of ultra-wideband signals[J]. IEEE Trans Microwave Theory Techniques, 2007, 55(2): 327-334.
- [29] LASO M A G, LOPETEGI T, ERRO M J, et al. Chirped delay lines in microstrip technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11(12): 486-488.
- [30] HAN Y, JALALI B. Photonic time-stretched analog-to-digital converter: fundamental concepts and practical considerations[J]. J Lightw Technol, 2003, 21(12): 3085-3103.