光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022062401

基于微波光子时间拉伸的雷达多普勒干扰信号产生技术研究

徐亚然*，郑天涯，熊怡因，徐嘉鑫，周　涛

（西南电子设备研究所，成都 610036）

摘　要： 基于传统数字射频存储的多普勒雷达干扰信号产生技术被证实为一种有效的方案，能够通过数字域存储雷达信号，并调制产生一定的频率偏移量，达到欺骗雷达的目的。此外，基于光学射频存储的雷达干扰信号产生技术虽然能够保留雷达信号的指纹信息，但无法产生预定的多普勒调制。文章提出了一种基于微波光子时间拉伸效应的多普勒雷达干扰信号产生技术，在光学射频存储的基础上，通过微波光子时间拉伸效应，在调制到光域的雷达脉冲信号中加入一定量的多普勒频移，达到对雷达速度欺骗的效果。并且对该项技术开展了仿真工作，验证了该方案的可行性和实现效果。

关键词： 微波光子；时间拉伸；雷达干扰；多普勒

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0823－05

Study on the Technology of Radar Doppler Jamming Signal Generation Based on Microwave Photonics Time-Stretch

XU Yaran, ZHENG Tianya, XIONG Yiyin, XU Jiaxin, ZHOU Tao

(Southwest Electronic Equipment Research Institute, Chengdu 610036, CHN)

Abstract: Traditional radar Doppler jamming signal generation based on DRFM is proven to be an effective method, which cheats radars by the method of storing radars' signal in digital domain, and generating Doppler frequency shift through modulating. On the other hand, radar jamming signal generation based on photonic radio frequency storage is able to reserve radar signal's fingerprint information, but is not able to generate desired Doppler modulation. This article suggests a technology of radar Doppler jamming signal generation based on microwave photonics time-stretch effect. Taking advantage of photonic radio frequency storage, through the effect of microwave photonics time-stretch, it added a certain Doppler frequency shift to the radar signal modulated into the optical domain, in order to cheat radars in velocity. Simulation was conducted to prove this method's feasibility and its effect.

Key words: microwave photonics; time-stretch; radar jamming; Doppler

0　引言

在现代雷达对抗领域，数字射频存储（Digital Radio Frequency Memory，DRFM）被证实为一种行之有效的干扰信号产生手段[1-2]。雷达干扰装备利用雷达信号接收机接收雷达信号，在数字域内实现对雷达信号的复制、延迟、叠加和多普勒调制等操作，产生干扰激励信号，并通过功放放大后转发，用以实现对对方雷达的假目标干扰。数字射频存储技术瞬时带宽较宽、调制灵活，广泛应用于当前的雷达对抗设备。

然而，在该项技术中，接收到的雷达信号必然经

收稿日期：2022－06－24.

*通信作者：徐亚然　E-mail：xuyaran1990@126.com

历下变频、模数变换、数字信号处理、数模变换、上变频等几个主要过程。由于当前模数转换器采样率的限制，最终产生的雷达虚假目标必然存在丢失雷达脉冲指纹信息的问题，这将为对方雷达的假目标识别提供可能。此外，如需获得更大的瞬时带宽，则需要等比例增加硬件规模，这将对机载、星载等应用条件提出不小挑战。

基于光学射频存储技术的超宽带雷达干扰信号产生技术是一种弥补数字射频存储不足的有效方式。该技术旨在将接收到的雷达射频信号调制到光域，在一段光纤中传输一段时间，并通过光开关选择不同的光纤路由，以控制脉冲延迟量，达到生成雷达假目标并转发的目的。该方式无需经历下变频、模数变换、数字信号处理、数模转换及上变频等过程，因此能够较好地保存雷达信号的指纹信息，使雷达对抗设备产生的假目标更加逼真，令对方雷达难以区分真假目标。然而，基于光学射频存储技术的超宽带雷达干扰信号产生技术只能完成对雷达信号的无失真复制，却无法实现数字射频存储技术擅长的多普勒调制。本文提出一种基于微波光子时间拉伸的雷达多普勒干扰信号产生技术，旨在利用微波光子领域的时间拉伸效应，在光学射频存储技术的基础上，实现对雷达信号的多普勒调制，以达到产生具有多普勒频移的虚假雷达脉冲的目的。

本文给出了该种雷达对抗设备的工作原理、系统组成及关键参数的选择依据，并采用 Matlab 仿真验证了该种设备的有效性。

1 基于数字射频存储技术的多普勒假目标产生

在当代雷达对抗技术中，DRFM 是一种常规干扰信号生产手段。雷达干扰装备利用雷达信号接收机接收雷达射频信号，并经过下变频设备变换为雷达中频信号，使之能够被当前的 ADC 采样并转换到数字域，随后根据干扰策略的制定，经过一定的数字信号处理手段，在雷达数字信号中加入时域延迟、复制、叠加，以及多普勒调制等，形成数字干扰信号，该信号经过 DAC 转换为中频干扰信号，再经过上变频设备转换为射频干扰信号，由此则完成了干扰激励信号的构成，经过功放设备放大后即可通过天线孔径完成干扰信号的发射。DRFM 干扰信号产生原理如图 1 所示。

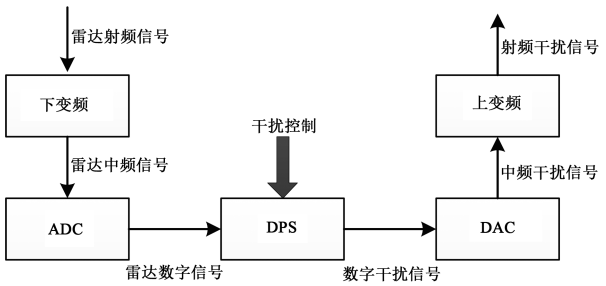


图 1 DRFM 原理框图

DRFM 具有适配带宽较宽、处理灵活、干扰策略容易重构等优点，是当代雷达对抗设备常用的干扰信号生产手段。但目前雷达已在发展识别干扰信息的多种方法，这将对 DRFM 的干扰效果带来挑战[3]。受限于目前模数转换器件的采样速率以及有效位数，在 DRFM 的模数转换过程中，将不可避免地丢失雷达信号的指纹信息，尤其是雷达脉冲上升沿及下降沿。当前模数转换器难以匹配陡峭的脉冲边沿特性，将导致无法高保真地产生虚假雷达脉冲信号，容易被雷达利用，分辨其真实的雷达回波信号与虚假信号，使雷达干扰失效。

2 基于光学射频存储的雷达干扰信号产生技术

为解决传统 DRFM 丢失雷达信号指纹信息的问题，基于光学射频存储技术的雷达干扰信号产生技术由于其独特的优势进入研究者们的视野[4]。

基于光学射频存储技术的雷达干扰信号产生装置典型框图如图 2 所示。首先由一个接收前端接收雷达信号，并输入直调激光器，将雷达信号转换为光信号。此射频光信号进入一个 2×2 光耦合器，一部分光进入延迟循环过程（包含掺铒光纤放大器（EDFA）以及光延迟组件），另一部分光输入光电转换器。进入延迟循环部分的光信号首先经历 EDFA 的光放大，以弥补链路的光功率损耗，随后进入光延迟组件，此光延迟组件可由不同长度的光纤及光开关矩阵组成，在干扰控制下产生不同的延迟组合，即在光域上完成了对雷达假目标延迟量的控制。随后此光信号进入 2×2 光耦合器，一部分光再次进入延迟循环过程，另一部分光则通过光电转换器转换为射频信号输出，此时产生的射频信号即为注入了不同时间延迟量的雷达干扰信号叠加。

相比于传统的 DRFM，基于光学射频存储的雷达干扰技术具有以下显著优点：

(1)不必经历模数及数模转换过程，能够产生逼真的雷达假目标信号，保存雷达脉冲的原始信息；

(2)具备瞬时大带宽能力，该装置的瞬时带宽受限于光电器件，目前直调激光器及光电转换器能够达到 40 GHz 带宽，远超 AD 及 DA 的水平；

(3)装置简单，易于控制重量、功耗，适用于各种平台。

但相比于 DRFM，该技术则存在干扰信号调制手段不够丰富的缺陷，其中最主要的是无法提供多普勒调制，对敌方雷达进行速度欺骗。

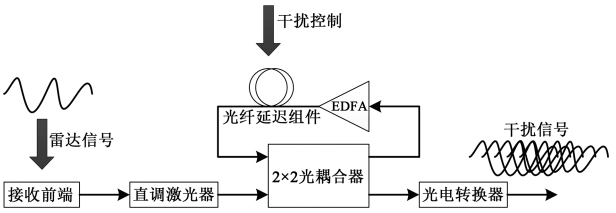


图 2　光学射频存储雷达干扰装置框图

3　微波光子时间拉伸

微波光子时间拉伸(Microwave Photonics Time-Stretch)可利用光学特性对射频信号进行时域拉伸处理。由于群速度色散效应，光脉冲在传输过程中会出现时域展宽现象，若强度调制一模拟信号在此光脉冲上，则该模拟信号将随光脉冲的时域展宽而被拉伸。利用微波光子时间拉伸效应，可构成一类光辅助模数转换器，成倍地提升模数转换器的有效采样率[5]。

微波光子时间拉伸效应同样可用于对输入射频信号进行多普勒正负频移调制。超连续谱光源(Supercontinuum Source，SC)发射出光脉冲输入到一段反常色散介质中，由于群速度色散效应，光脉冲在传输过程中将由一个窄脉冲时域展宽为一个宽脉冲。当光脉冲展宽到一定程度、具备一定的时域连续性时，可作为一模拟信号的光载波。此时，可将射频信号通过电光强度调制到光域上。进一步地，将此携带有射频信号的光脉冲再经过一段反常色散的传输介质，则调制于其上的射频信号会随光脉冲的展宽而展宽，从时域上看，等同于射频信号被“降速”，如图 3 所示。相反，如果将该携带有射频信号的光脉冲经过一段正常色散的传输介质，则射频信号将随光脉冲的压缩而压缩，从时域上看，等同于射频信号被“升速”，如图 4 所示。上述过程从频域上看，等同于对射频信号进行多普勒负频移或正频移调制。

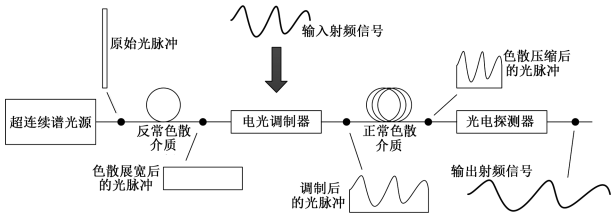


图 3　利用时间拉伸效应对射频信号“降速”原理示意图

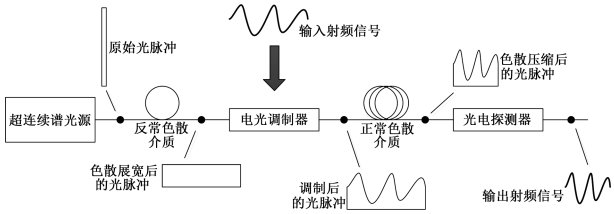


图 4　利用时间拉伸效应对射频信号“升速”原理示意图

4　基于微波光子时间拉伸的雷达多普勒干扰信号产生

利用微波光子时间拉伸效应，可在基于光学射频存储雷达干扰信号产生的基础上，实现对雷达信号的多普勒调制，产生具有速度欺骗的雷达假目标。

该技术的基本原理为：将需要处理的雷达信号调制到一个经由第一段色散介质时域展宽的光脉冲上，再将此光脉冲输入到第二段色散介质，该雷达信号将会在此介质中色散展宽或者压缩，则该雷达信号的频率将随之改变，将此脉冲通过光电转换器转换为射频信号，即产生了具有多普勒调制特性的雷达脉冲，可作为雷达干扰设备的干扰激励信号。

此类装置的设计重点在于两段色散介质色散量的选取。由于微波光子时间拉伸的时隙与光波长的映射关系[5]，第二段色散介质色散量与第一段色散介质色散量的比值决定了该系统可带来的多普勒频移量。

假设 $\Delta\lambda$ 为光脉冲带宽，L_1 为第一段色散介质长度，D_1 为第一段色散介质的色散参量，则一个光脉冲能够经过第一段色散介质后，形成光脉冲的时间窗口为

$$T_{\text{aperture}} = \Delta\lambda \times D_1 \times L_1 \tag{1}$$

如需获得负频率偏移的多普勒雷达信号，则第二段可选取与第一段同种色散的介质，设第二段色散介质长度为 L_2，则总的时间拉伸倍数仅与两段色散介质长度有关，若输入射频信号为 Rf，则获得的多普勒频移量为

$$Rf_{\text{doppler}} = -Rf \cdot \frac{L_2}{L_1} \tag{2}$$

若需获得正频率偏移的多普勒雷达信号，则第二段应选取与第一段色散方向相反的色散介质，设第二段色散介质的色散系数为 D_2（与 D_1 符号相反），长度为 L_2，输入射频信号为 Rf，则获得的多普勒频移量为

$$Rf_{\text{doppler}} = -Rf \cdot \frac{L_2 \cdot D_2}{L_1 \cdot D_1} \tag{3}$$

该类基于微波光子时间拉伸的雷达多普勒干扰信号产生装置如图 5 所示。首先，利用一个超连续谱光源发射一个光脉冲，进入到色散组件 1 中，此色散组件可由不同长度的色散介质及光开关组成，根据干扰控制选通不同色散总量的光路由，适配不同的应用场景。进一步地，该光脉冲进入到电光调制器，与此同时，雷达信号经过一个微波前端放大后，进入电光调制器，对该光脉冲进行强度调制，则光脉冲携带有雷达脉冲信息。随后，该脉冲进入到色散组件 2，该组件同样由不同长度的色散介质及光开关组成，可根据干扰控制选通不同的色散系数（不同值的正常色散系数或反常色散系数）的光路由，以获得需要的正频移量或负频移量，经此过程，则可得到携带有多普勒频移雷达信号的光脉冲。最后该光脉冲经过光电探测器转换为电信号，即可作为干扰信号发射。

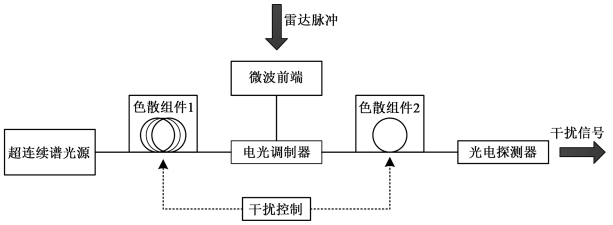


图 5 基于微波光子时间拉伸效应多普勒雷达干扰信号产生装置框图

5 仿真结果

本文采用 Matlab 对该类干扰设备进行数字仿真。

假设超连续谱光域发射光脉冲的半高全宽（FWHM）为 400 fs，选用一种 GVD 参数为 180×10^{-27} S^2/m 的色散光纤作为第一段色散介质，该光纤长度为 2 000 m。则超连续谱激光脉冲及经过色散展宽后的光脉冲如图 6 所示，可见经过这一段色散展宽后，光脉冲的脉宽已达到纳米量级。

产生的光脉冲作为载波，在电光调制器接收雷达信号的强度调制，假设该雷达脉冲频率为 10 GHz（机载火控雷达频段）[6]，则经过调制后，光脉冲携带有该雷达脉冲信息。随后将此脉冲输入第二段色散介质，假设该色散介质为与第一段色散介质参数相同的光纤，长度为 100 m，则经过色散后，光脉冲上携带的雷达信号在时域上被拉伸，则会具有负向多普勒频移，根据公式（2），此时频移量为 500 MHz，如图 7 所示。另外，也可以根据选取不同的色散介质长度来控制需要施加的多普勒频移量。

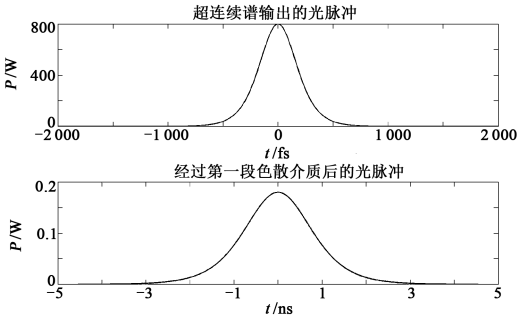


图 6 光脉冲色散展宽前后对比

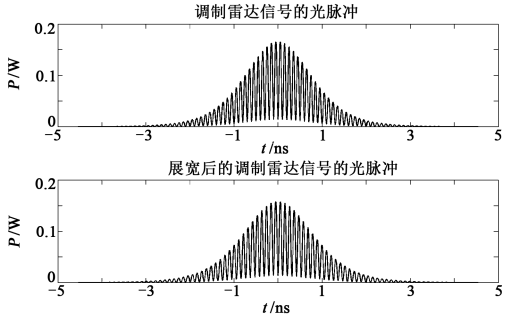


图 7 调制有雷达信号的光脉冲色散展宽前后对比

经过去包络处理[7]后即可得到负频移多普勒调制的雷达脉冲，输入的雷达信号及输出的雷达干扰信号对比如图 8 所示，可见经过该系统，复制的雷达脉冲被时域展宽，即实现了负向多普勒频移。

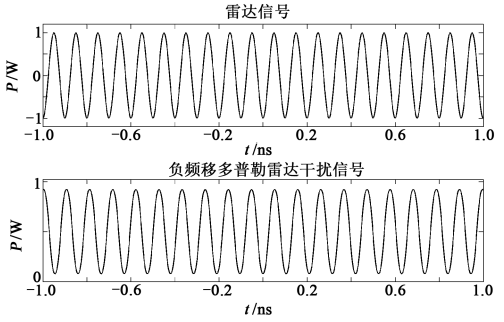


图 8 雷达信号与多普勒雷达干扰信号对比

同理，如需获得正频移的多普勒雷达干扰信号，则在第二段色散介质的 GVD 参数可选取为与第一段

相反。如选用一种 GVD 参数为 -90×10^{-27} S^2/m 的光纤为色散介质，长度为 50 m，则根据公式(3)，可获得 125 MHz 的多普勒正频移。此时输入的雷达信号及输出的雷达干扰信号对比如图 9 所示，可见经过该系统，复制的雷达脉冲被时域压缩，即实现了正向多普勒频移。

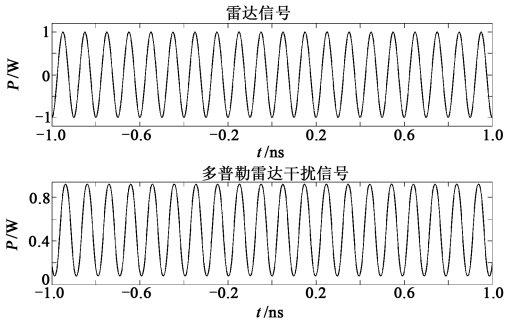


图 9　雷达信号与多普勒雷达干扰信号对比

6　结论

本文提出了一种基于微波光子时间拉伸效应的多普勒雷达干扰信号产生技术，给出了该类装置的基本工作原理、设备结构框图以及关键参数的选取依据。该技术在射频光存储雷达干扰技术的基础上，利用微波光子时间拉伸效应，实现了在光域上对雷达脉冲进行多普勒调制，既保存了雷达脉冲的指纹信息，又具备速度欺骗的能力。数字仿真结果验证了该技术的可行性，根据关键参数的设置，能够获得预期的雷达脉冲多普勒调制效果。

相比传统的 DRFM，该技术具有保存雷达脉冲指纹信息、设备简单、瞬时带宽大等显著优势，但干扰控制的灵活性受限于设备硬件的复杂度，难以比拟纯数字设备的复杂样式。在未来的雷达干扰装备中，两种干扰技术有望互为补充、相得益彰。

参考文献：

[1] 孙智勇，唐　宏，余定旺，等. 基于 DRFM 的机载 PD 雷达干扰研究[J]. 现代防御技术，2012，40(4)：138-142.
Sun Zhiyong，Tang Hong，Yu Dingwang，et al. Interference on airborne PD radar using DRFM-based technology[J]. Modern Defence Technology，2012，40(4)：138-142.

[2] 王　铁，陈　波. 基于 DRFM 的 PD 雷达速度欺骗干扰[J]. 电子对抗，2006，111(6)：19-23.
Wang Tie，Chen Bo. Velocity deception jamming on PD radar based on DRFM[J]. Electronic Warfare，2006，111(6)：19-23.

[3] 赵雪飞，赵　川，刘　峥. PD 雷达抗距离-速度同步拖引干扰的频谱识别法[J]. 雷达与对抗，2005，(6)：21-24.
Zhao Xuefei，Zhao Chuan，Liu Zheng. Frequency domain technique of PD radar to counter synchronous jamming on range and velocity[J]. Radar and ECM，2005，(6)：21-24.

[4] 徐嘉鑫，周　涛，陈吉欣. 应用于超宽带雷达干扰的光学射频存储技术研究[J]. 半导体光电，2018，39(4)：582-585.
Xu Jiaxin，Zhou Tao，Chen Jixin. Study on optical RF memory applying in jamming of UWB radar [J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(4)：582-585.

[5] Han Y，Jalali B. Photonic time-stretched analog-to-digital converter：Fundamental concepts and practical considerations [J]. J. of Lightwave Technol.，2003，21(12)：3085.

[6] 季　节. 机载火控雷达系统技术及胸膛能够设计概述[J]. 空载雷达，2002 (4)：1-8.
Ji Jie. Summary of airborne fire control radar system technology and design[J]. Airborne Radar，2002 (4)：1-8.

[7] Han Y，Jalali B. Time-bandwidth product of the photonic time-stretched analog-to-digital converter [J]. Trans. on Microwave Theory and Techniques，2003，51(7)：1886-1892.

作者简介：

徐亚然(1990－)，男，硕士，从事微波光子技术应用研究。