

Full-Duplex Radio: Increasing the Spectral Efficiency for Military Applications

(STO-TR-IST-ET-101)

Executive Summary

This report summarizes the results of the Exploratory Team IST-ET-101. The team studied the problem of a scarce and contested electromagnetic frequency spectrum, especially in the VHF and UHF bands. This fact is in strong contrast to the growing bandwidth requirements generally and particularly in the military domain. The success of future NATO operations relies more than ever on new real-time services going hand in hand with increased data throughputs and with robustness against and compatibility with electronic warfare. Therefore, future tactical communication and electronic warfare technologies (electronic attack, electronic support, and electronic protection) must aim at using the full spectral capacity while at the same time providing NATO an advantage in the tactical environment. The availability of spectral resources should not depend on technological, but on operational circumstances.

In order to find a powerful solution for the problem the team has analysed the relevance of emerging in-band full-duplex transceiver technology for future military applications in the domains of tactical communications and electronic warfare. In-band full-duplex transceiver technology allows a device to simultaneously transmit and receive radio signals on the same frequency and allows use of a single antenna.

Historically, in-band full-duplex transceivers have been considered to be technically impossible due to the strong self-interference from the transmit path into the reception path of the transceiver. In the past, to avoid this self-interference problem, quasi full-duplex approaches have been proposed which, e.g., either use the same frequency at different times for transmit and receive operations (time division multiplex operation) or use different frequencies at the same time (frequency division multiplex operation). However, these are just means which allow the user to experience a full-duplex operation. Obviously, at the air interface, these quasi full-duplex approaches reduce the spectral efficiency when compared to a true in-band full-duplex transceiver which offers both types of operations at the same time on the same frequency.

The IST-ET-101's analysis of the relevance of the emerging in-band full-duplex transceiver technology for future military applications starts with the provision of relevant background information. To this end, two conflicting trends with respect to frequency spectrum are discussed.

On the one hand, the present and future tactical communication services in NATO-led operations like NATO Response Forces (NRF), Very High Readiness Joint Task Force (VJTF), Enhanced Forward Presence (EFP), and also in NATO initiatives like Federated Mission Networking (FMN) are raising more and more attention for the need for assured communications. Consequently, more military frequency spectrum is required to satisfy the information exchange needs in the wireless tactical communications domain. In addition, the information exchange needs to be protected against electronic warfare threats (e.g., intentional jamming, interception, reconnaissance).

On the other hand, frequency spectrum is a scarce and limited resource which cannot be augmented. This leads to the challenge to use the frequency spectrum as efficiently as possible. Several solutions to cope with the spectrum challenge are briefly discussed. One of them is the emerging in-band full-duplex radio technology.

In the next step of the IST-ET-101's analysis more details about this new technology are provided. In particular, it is highlighted that the intrusion of a self-interference signal in the reception path causes the key challenges for designing full-duplex systems. This self-interference signal needs at first to be modelled properly and secondly, be cancelled from the reception path. Some state-of-the-art approaches which have been proposed from researchers at different universities are briefly discussed. All of them have in common that they use a two-staged approach, one stage in the analog domain and another stage in the digital domain. Exemplary solutions for both stages are briefly discussed within this report.

The assessment of a relevant subset of state-of-the-art prototypes leads to two general observations:

- Firstly, the feasibility of full-duplex operation has been convincingly proven for low-power commercial mobile communication systems in a laboratory environment. Laboratory testing has the key advantage of reproducibility of the test results, but it typically suffers from operational relevance because of idealized environmental conditions (e.g., indoor, limited ranges, no mobility). The independent state-of-the-art prototypes around the world achieve beyond 100 dB of total Self-Interference Cancellation (SIC), even with rather large operation bandwidth (up to 80 MHz).
- Secondly, almost without exceptions, the existing experimental research is limited to the 2.4 GHz Industrial, Scientific, and Medical (ISM) band.

From these two observations it follows immediately that:

- Results need to be confirmed under realistic conditions, e.g., in field environments for a selection of relevant operational scenarios. Compared to laboratory tests, field tests allow to better reflect outdoor conditions like communication ranges, multipath propagation, mobility (Doppler), environmental interferences, etc. As an intermediate step between laboratory and field testing, sophisticated high dynamic range channel emulators might be considered.
- Further research is needed to confirm the prospects of full-duplex radios:
 - When operating in the mobile field environment, under e.g., multipath, fading, Doppler conditions.
 - At lower military frequencies, e.g., at HF, VHF and UHF. Although modulation bandwidth is typically much smaller in military systems at lower carrier frequencies, frequency hopping still requires wideband self-interference cancellation.
 - At higher transmit powers, e.g., 20 or even 50 Watts, to ensure higher communication ranges.

Some potential operational scenarios are also discussed, in particular, examples where the new full-duplex technology can beneficially be used in both military domains, tactical communications and electronic warfare. These examples are categorized in three groups:

- Spectrally efficient two-way tactical communications;
- Tactical communications with electronic warfare; and
- Signal intelligence with simultaneous electronic attack.

Finally, the IST-ET-101 has also provided an initial basic multinational demonstration which proves that it is in principle feasible to set up a military demonstrator for an in-band full-duplex radio transceiver. For this purpose, an implementation of the NATO Narrowband Waveform (NBWF) of one ET-101 member nation has been used in an in-band full-duplex transceiver system of another ET-101 member nation.

The IST-ET-101's analysis of the relevance of the emerging in-band full-duplex transceiver technology for future military applications has shown that it is in principle possible to build such transceivers. However, most findings published so far, are not specific for military use cases and side constraints such as

typical military frequency bands and transmit powers. Further research is needed to evaluate and demonstrate the benefits of the in-band full-duplex transceiver technology in both military domains, tactical communications and electronic warfare. In addition, field tests have to be performed to increase the technology readiness level.

The results of IST-ET-101's analysis pave the way for an in-depth follow-on study. Thus, the results motivate the establishment of a Research Task Group (RTG) on military full-duplex radio technology. Such a follow-on RTG might, for example, work on an extended demonstrator to show the benefits which are achievable in each of the above-mentioned groups. For instance, in the spectrally efficient two-way tactical communications group the gain of the "true" full-duplex approach over a classic approach to "quasi" full-duplex operation can be determined.

La Radio Full-Duplex

(STO-TR-IST-ET-101)

Synthèse

Ce rapport résume les résultats de l'équipe exploratoire IST-ET-101. L'équipe a étudié le problème du spectre électromagnétique de fréquences qui est une ressource rare et contestée, particulièrement dans les bandes VHF et UHF. Ce fait entre en contradiction avec les exigences d'augmentation de la bande passante particulièrement dans le domaine militaire. Le succès des opérations de l'OTAN futures compte plus que jamais sur des services temps-réel et des plus grands débits de données incluant de la robustesse contre et de la compatibilité avec du matériel de guerre électronique. Par conséquent, les futures communications tactiques et les technologies de guerre électronique (attaque électronique, support électronique, et protection électronique) doivent viser à utiliser la totale capacité spectrale tout en donnant à l'OTAN un avantage dans un environnement tactique. La disponibilité des ressources spectrales ne doivent pas dépendre des circonstances technologiques, mais plutôt opérationnelles.

Afin de trouver une solution puissante au problème, l'équipe a analysé la pertinence de la nouvelle technologie d'émetteur-récepteur full-duplex en bande pour les futures applications militaires dans les domaines des communications tactiques et de la guerre électronique. La technologie des émetteurs-récepteurs full-duplex en bande permet à un appareil d'émettre et de recevoir simultanément des signaux radio sur la même fréquence et d'utiliser une seule antenne.

Historiquement, les émetteurs-récepteurs full-duplex en bande ont été jugés techniquement impossibles en raison de la forte auto-interférence de la chaîne de transmission dans la chaîne de réception. Dans le passé, pour éviter ce problème d'auto-interférence, des approches quasi full-duplex ont été proposées, qui utilisent, par exemple, la même fréquence à des moments différents pour les opérations d'émission et de réception (opération de multiplexage temporel) ou utilisent des fréquences différentes en même temps. (fonctionnement en multiplexage par répartition en fréquence). Cependant, ce ne sont que des moyens détournés permettant à l'utilisateur de faire l'expérience d'un fonctionnement en full-duplex. Évidemment, à l'interface air, ces approches quasi full-duplex réduisent l'efficacité spectrale par rapport à un véritable émetteur-récepteur full-duplex en bande, qui offre les deux types d'opérations au même moment sur la même fréquence.

L'analyse par IST-ET-101 de la pertinence de la nouvelle technologie d'émetteur-récepteur full-duplex en bande pour les futures applications militaires commence par la fourniture d'informations de base pertinentes. À cette fin, deux tendances contradictoires concernant le spectre de fréquences sont discutées.

D'une part, les services de communication tactiques présents et futurs dans des opérations dirigées par l'OTAN telles que NATO Response Forces (NRF), Very High Readiness Joint Task Force (VJTF), Enhanced Forward Presence (EFP), ainsi que dans les initiatives de l'OTAN comme Federated Mission Networking (FMN), attirent de plus en plus l'attention sur la nécessité de communications garanties. Par conséquent, davantage de spectre militaire est nécessaire pour répondre aux besoins en matière d'échange d'informations dans le domaine des communications tactiques sans fil. En outre, l'échange d'informations doit être protégé contre les menaces de guerre électronique (par exemple, brouillage intentionnel, interception, reconnaissance).

D'autre part, le spectre de fréquences est une ressource rare et limitée qui ne peut pas être augmentée. Cela nous oblige à utiliser le spectre de fréquences aussi efficacement que possible. Plusieurs solutions pour faire

face au défi du spectre sont brièvement discutées. L'une d'entre elles est la technologie émergente de la radio full-duplex.

Dans la prochaine étape de l'analyse IST-ET-101, davantage de détails sur cette nouvelle technologie sont fournis. En particulier, il est souligné que l'intrusion d'un signal auto-interférent dans la chaîne de réception constitue le principal défi de la conception de systèmes en full-duplex. Ce signal d'auto-interférence doit d'abord être modélisé correctement et, d'autre part, être annulé de la chaîne de réception. Quelques approches de pointe proposées par des chercheurs de différentes universités sont brièvement présentées. Toutes ont en commun d'utiliser une approche en deux temps, une étape dans le domaine analogique et une autre dans le domaine numérique. Des solutions exemplaires pour les deux étapes sont brièvement présentées dans ce rapport. L'évaluation d'un sous-ensemble pertinent de prototypes à la pointe de la technologie conduit à deux observations générales:

- Premièrement, la faisabilité du fonctionnement en full-duplex a été prouvée de manière convaincante pour les systèmes de communication mobiles commerciaux à faible puissance dans un environnement de laboratoire. Les tests de laboratoire présentent le principal avantage de reproductibilité des résultats de test, mais ils souffrent généralement d'une faible pertinence opérationnelle en raison de conditions environnementales idéalisées (par exemple, à l'intérieur, portées limitées, sans mobilité). Les prototypes indépendants les plus récents dans le monde atteignent plus de 100 dB d'annulation d'auto-interférence totale (SIC), même avec une bande passante de fonctionnement relativement importante (jusqu'à 80 MHz).
- Deuxièmement, presque sans exception, la recherche expérimentale existante est limitée à la bande Industrielle, Scientifique et Médicale (ISM) de 2,4 GHz.

Il découle immédiatement de ces deux observations que :

- Les résultats doivent être confirmés dans des conditions réalistes, par exemple dans des environnements de terrain pour une sélection de scénarios opérationnels pertinents. Comparés aux tests de laboratoire, les tests sur le terrain permettent de mieux refléter les conditions extérieures telles que les distances de communication, la propagation par trajets multiples, la mobilité (Doppler), les interférences environnementales, etc. En tant qu'étape intermédiaire entre les tests de laboratoire et sur le terrain, des émulateurs sophistiqués peuvent être utilisés.
- Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer les perspectives des radios full-duplex :
 - Lors d'un fonctionnement dans un environnement de terrain mobile, par ex. trajets multiples, atténuation, Doppler.
 - À des fréquences militaires inférieures, par exemple en ondes décimétriques, VHF et UHF. Bien que la largeur de bande de modulation soit généralement beaucoup plus petite dans les systèmes militaires à basses fréquences porteuses, le saut de fréquence nécessite toujours une annulation d'auto-interférence à large bande.
 - À des puissances d'émission supérieures, par ex. 20 voire 50 watts, pour assurer des distances de communication plus élevées.

Certains scénarios opérationnels potentiels sont également abordés, en particulier des exemples dans lesquels la nouvelle technologie de full-duplex peut être utilisée de manière avantageuse dans les domaines militaires, des communications tactiques et de la guerre électronique. Ces exemples sont classés en trois groupes :

- Communications tactiques bidirectionnelles à efficacité spectrale;
- Communications tactiques avec du matériel de guerre électronique;
- Intelligence du signal avec attaque électronique simultanée.

Enfin, l'IST-ET-101 a également fourni une première démonstration multinationale de base démontrant qu'il est en principe possible d'installer un démonstrateur militaire pour un émetteur-récepteur radio full-duplex en bande. À cette fin, une implémentation de la Narrowband Waveform (NBWF) de l'OTAN d'un pays membre de l'ET-101 a été utilisée dans un système d'émetteur-récepteur full-duplex en bande d'un autre pays membre de l'ET-101.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'analyse par IST-ET-101 de la pertinence de la nouvelle technologie d'émetteur-récepteur full-duplex en bande pour les applications militaires futures a montré qu'il est en principe possible de construire de tels émetteurs-récepteurs. Cependant, la plupart des conclusions publiées jusqu'à présent ne sont pas spécifiques aux utilisations militaires et aux contraintes secondaires telles que les bandes de fréquences militaires typiques et les puissances d'émission. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer et démontrer les avantages de la technologie d'émetteur-récepteur full-duplex en bande dans les domaines militaires, des communications tactiques et de la guerre électronique. De plus, des tests sur le terrain doivent être effectués pour augmenter le niveau de préparation de la technologie.

Les résultats de l'analyse d'IST-ET-101 ouvrent la voie à une prochaine étude approfondie. Les résultats ont donc motivé la création d'un groupe de travail sur la technologie de la radio militaire full-duplex. Un tel prochain RTG pourrait, par exemple, travailler sur un démonstrateur étendu pour montrer les avantages réalisables dans chacun des groupes susmentionnés. Par exemple, dans le groupe de communications tactiques bidirectionnelles à l'efficacité spectrale, il est possible de déterminer l'avantage de l'approche « véritable » en full-duplex par rapport à une approche classique du fonctionnement en « quasi » full-duplex.