

# La régulation de flux dans les réseaux Ethernet démontre des avantages indiscutables en matière de temps réel

Dans les environnements automobile et d'automatisation industrielle, la combinaison de performances temps réel et de communications à large bande passante devient une exigence clé. Avec la mise en œuvre des améliorations TSN (Time Sensitive Networking) d'Ethernet dans des puces silicium, les équipementiers et les intégrateurs système disposent de ce dont ils ont besoin pour déployer des réseaux temps réel à large bande passante dans les véhicules et les équipements d'usine avancés. Explications de la société Toshiba.

Les secteurs de l'automobile et de l'automatisation industrielle ont aujourd'hui tous deux un point commun. La numérisation rapide qu'ils connaissent est rendue possible par la disponibilité de puces silicium à haute performance. A l'heure actuelle, l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique (ML) sont utilisés pour augmenter les mécanismes de contrôle traditionnel avec des fonctions plus avancées. La clé de bon nombre de ces architectures réside dans l'utilisation d'une intelligence et d'un contrôle distribués qui nécessitent la capacité de déplacer de grandes quantités de données non seulement rapidement, mais aussi de manière prévisible. Dans le secteur automobile, une tendance clé dans la conception de l'in-

**AUTEURS**



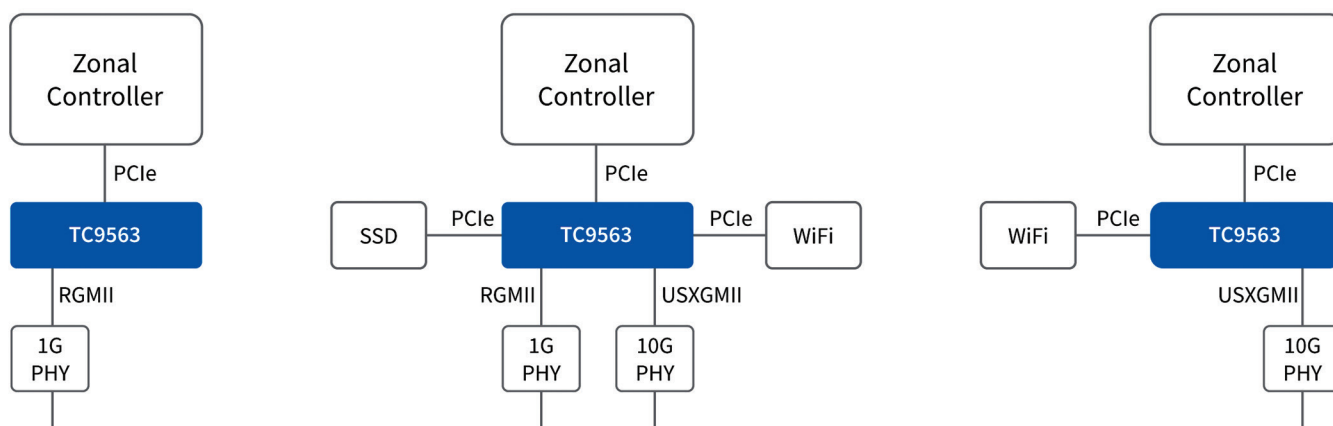
**Goran Filimonovic,**  
Chief Engineer,  
Toshiba  
Electronics  
Europe.

telligence distribuée est l'utilisation croissante d'architectures dites « zonales ». Au lieu d'associer des fonctions spécifiques à des unités de commande électroniques ECU (Electronic Control Units) et de relier ces dernières par un réseau Ethernet ou un bus de terrain traditionnel tel que CAN, les constructeurs automobiles regroupent les applications sur un plus petit nombre de puces-systèmes SoC à hautes performances pouvant être affectées à de multiples applications. Dans les architectures zonales, les tâches mises en œuvre par chaque application sont réparties entre les SoC. Par exemple, un nœud de stockage peut capturer à la fois des données d'instrumentation, provenant des opérations et des mouvements du véhicule, et le contenu multimédia que les occupants souhaitent

regarder ou écouter pendant leur voyage. Toutes les communications sont assurées par des passerelles zonales qui garantissent un niveau de sécurité élevé entre les différentes applications, de sorte que les applications d'info-divertissement n'interfèrent pas avec les fonctions de commande du moteur, de la direction ou des systèmes de freinage (figure 1). Une architecture similaire se retrouve dans les systèmes industriels. Au lieu que chaque machine-outil soit une unité indépendante communiquant avec les autres par l'intermédiaire d'un bus de terrain à faible bande passante tel que Profibus, les machines sont reliées par Ethernet à haut débit. Cela permet d'envoyer des vidéos et autres données issues de capteurs vers des ordinateurs de périphérie pour traitement. Les appli-

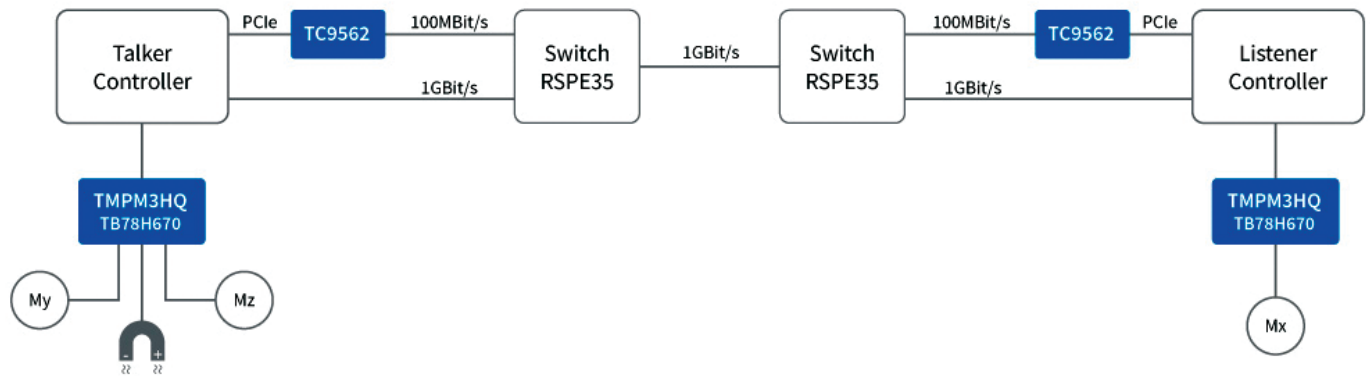
## 1 STRUCTURE TYPIQUE D'UNE ARCHITECTURE ZONALE DANS UN VÉHICULE DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Dans ce type d'architecture, il faut garantir un niveau de sécurité élevé entre les différentes applications de sorte que, par exemple, les applications d'info-divertissement n'interfèrent pas avec les fonctions de commande du moteur, de la direction ou des systèmes de freinage



## 2 STRUCTURE TYPIQUE D'UNE ARCHITECTURE ZONALE DANS UN CONTEXTE INDUSTRIEL

Dans ce type d'architecture où les traitements peuvent être effectués par des ordinateurs de périphérie éloignés des machines industrielles, il faut pouvoir évaluer à distance la qualité des opérations et assurer l'alignement correct de la tête de la machine-outil.



cations d'intelligence artificielle exécutées sur ces ordinateurs périphériques peuvent déterminer rapidement si les machines-outils fonctionnent correctement ou si des modifications doivent être apportées pour compenser la température ou d'autres changements de conditions (figure 2).

### Le défi des architectures zonales

Le défi de ces architectures zonales est de s'assurer que ces implémentations distribuées peuvent atteindre les performances en temps réel requises. Dans le domaine de l'automatisation industrielle, les boucles de contrôle sont généralement conçues pour récupérer des mises à jour émises par les capteurs à un rythme constant. Elles peuvent développer des instabilités ou perdre la précision vitale de positionnement si les mises à jour et les lectures effectuées par les capteurs (qui sont attendues par les algorithmes de contrôle) sont retardées au-delà de la fenêtre de traitement. Dans ce cas, la machine est amenée à utiliser des données probablement obsolètes, qui ne représentent plus la réalité physique. Une latence imprévisible affecte également l'action de l'utilisateur dans l'environnement automobile. Les flux de données peuvent interférer les uns avec les autres au point que les occupants de la voiture constatent des décalages dans la vidéo. Et la perception générale sera celle d'un système qui ne peut pas suivre le rythme.

Une solution consiste à augmenter la marge de manœuvre en passant à une version d'Ethernet à plus haut

débit. Mais cette option s'avérera généralement insuffisante. Le problème réside dans le principe du « best-effort » de la norme Ethernet de base : tout nœud disposant d'un paquet prêt à envoyer peut accéder au réseau et bloquer toute autre activité sur ce segment de réseau jusqu'à ce qu'il ait terminé. Cette approche architecturale impacte directement la conception de nombreux contrôleurs Ethernet conventionnels. Ces derniers disposent de simples tampons pour la mise en file d'attente des paquets et ceux-ci ne font pas de différence entre les types de trafic. Une commande hautement prioritaire encapsulée dans un paquet court peut facilement être contrainte à attendre l'envoi d'une ou de plusieurs longues trames vidéo avant d'être autorisée à accéder au réseau. Ce comportement a été étudié par Toshiba dans une plateforme de référence destinée à montrer comment les applications dans les systèmes automobiles et industriels sont affectées par l'imprévisibilité du réseau.

### Les capacités temps réel mises au banc d'essai

Dans le banc d'essai créé par les ingénieurs de Toshiba, des contrôleurs Ethernet à haut débit, capables de prendre en charge les interfaces réseau à 1 Gbit/s et à 10 Gbit/s, sont chacun connectés à une puce-système hôte où s'exécute le code des applications pour simuler le comportement de divers cas d'usage attendus dans des environnements automobiles ou d'automatisation industrielle. Une conception de référence similaire a également servi à démontrer une latence garantie et

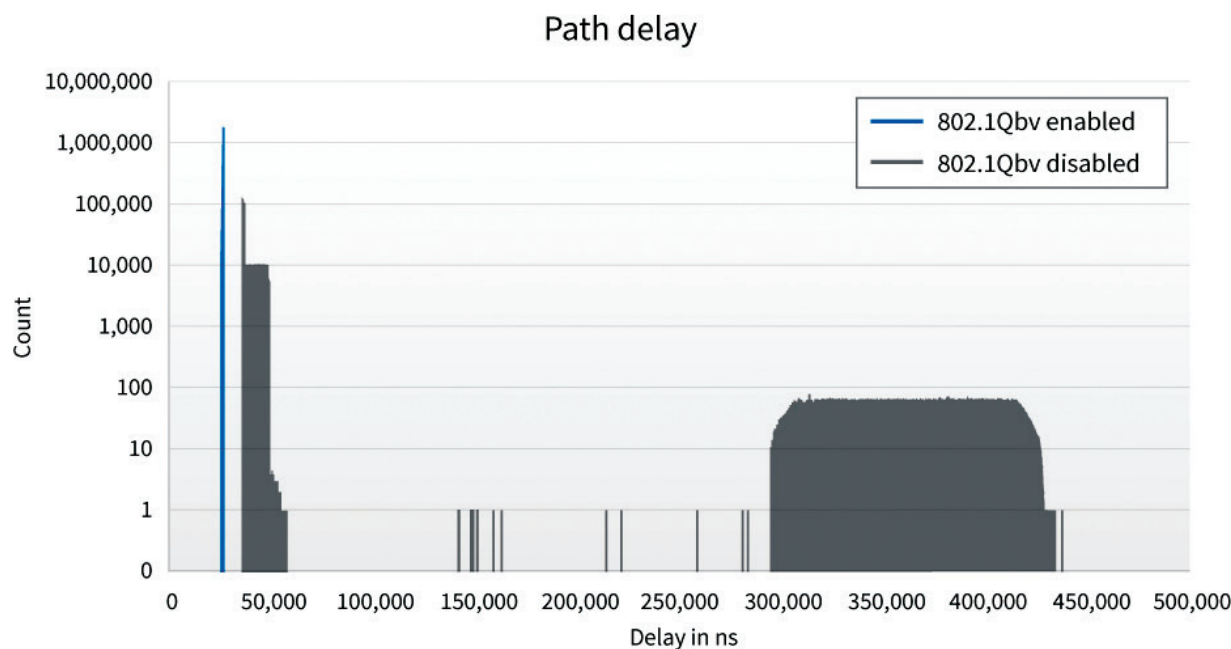
une faible gigue avec de l'Ethernet à large bande passante dans les environnements d'automatisation industrielle.

Les tests effectués par Toshiba sur ces conceptions de référence ont démontré à quel point l'utilisation du protocole Ethernet IEEE 802.1 conventionnel peut entraîner un retard important pour un petit pourcentage de paquets nécessitant un délai de livraison prévisible, ce qui peut avoir des conséquences graves sur les applications temps réel. Dans les cas où le trafic à faible criticité consomme relativement peu de bande passante (moins de 1 Mbit/s dans un réseau à 1 Gbit/s), le délai d'acheminement du trafic à haute criticité, tel que les paquets utilisés pour transporter les commandes moteur, a été mesuré jusqu'à 60 µs dans l'expérience, dans un contexte où les paquets ont été transférés de l'interlocuteur à l'auditeur sur trois sauts au travers de deux commutateurs. Avec des quantités plus importantes de trafic de fond à faible priorité, consommant jusqu'à 840 Mbit/s de bande passante, le retard maximal d'acheminement a été multiplié par plus de sept pour atteindre près de 440 µs.

Dans ces conditions, la répartition des délais d'acheminement est devenue fortement bimodale, de nombreux paquets subissant des retards de plus de 300 µs, bien qu'une grande partie d'entre eux atteignent leur destination en moins de 60 µs. Lors des tests des effets de ces retards dans un scénario industriel (les paquets arrivant après un temps limite programmé étant abandonnés au lieu d'être utilisés pour fournir des

### 3 COMPARAISON DU TEMPS DE PROPAGATION ENTRE ETHERNET STANDARD ET ETHERNET TSN AVEC GPTP/IEEE 802.1QBV

Alors que le délai d'acheminement dans une configuration reposant sur des protocoles traditionnels variait entre 50  $\mu$ s et 430  $\mu$ s, la distribution des paquets TSN utilisant les fonctionnalités de gPTP et IEEE 802.1Qbv a été réduite à une distribution normale beaucoup plus étroite centrée autour de 25,5  $\mu$ s et avec une gigue de seulement 0,3  $\mu$ s.



données potentiellement incorrectes à une boucle de contrôle), le résultat a été l'impossibilité d'obtenir un mouvement régulier et d'atteindre les positions cibles programmées.

#### Les mécanismes TSN

Les ajouts de type TSN (Time-Sensitive Networking) à la norme Ethernet permettent aux OEM et aux intégrateurs d'utiliser le réseau à haut débit pour des applications temps réel et de streaming multimédia. Les mécanismes TSN comprennent l'IEEE 802.1AS, le protocole gPTP (Generalized Precision Time Protocol) qui définit le comportement au niveau timing et synchronisation pour Ethernet dans les environnements TSN, et la norme IEEE 802.1Qbv, qui ajoute des améliorations pour permettre la gestion du trafic selon un échéancier strict.

Le gPTP permet aux périphériques d'extrémité d'un réseau Ethernet de convenir d'une heure locale commune avec une précision inférieure à la microseconde et de prendre en compte les retards de parcours sur le réseau qui les relient. Avec une référence temporelle commune, gPTP permet l'utilisation d'une régulation de flux (traffic shaping) temporelle et d'un ordonnancement des paquets pour garantir que les paquets à haute criticité soient livrés dans un délai connu. Le planificateur temporel IEEE

802.1Qbv sépare les fenêtres de transmission selon un cycle de longueur fixe. Au sein de chaque cycle, différentes tranches de temps sont allouées à un ou plusieurs des huit niveaux de priorité IEEE 802.1Q et les paquets attribués à ces niveaux se voient accorder l'usage exclusif du réseau pendant la durée de cette fenêtre temporelle.

Toshiba a construit ses bancs d'essai autour de contrôleurs Ethernet qui mettent en œuvre les fonctionnalités gPTP et IEEE 802.1Qbv afin de voir l'effet de ces techniques sur des tâches logicielles représentatives des secteurs automobiles et industriels. Alors que le délai d'acheminement dans une configuration reposant sur des protocoles traditionnels variait entre 50  $\mu$ s et 430  $\mu$ s, la distribution des paquets « sensibles au temps » qui utilisaient les fonctionnalités de gPTP et IEEE 802.1Qbv a été réduite à une distribution normale beaucoup plus étroite centrée autour de 25,5  $\mu$ s et avec une gigue de seulement 0,3  $\mu$ s. Cela a permis un contrôle fluide de tous les axes de la machine-outil, sans aucune cible de positionnement manquée (figure 3). Grâce à la prise en charge de gPTP, IEEE 802.1Qav, IEEE 802.1Qbv et d'autres éléments importants pour le contrôle en temps réel, les contrôleurs TC9562 et TC9563 de Toshiba

sont des éléments importants pour la construction de systèmes fiables de contrôle automobiles et industriels. Le TC9562 est compatible avec l'Ethernet à 1 Gbit/s et le TC9563 étend la capacité réseau à deux ports capables tous deux de soutenir des débits de données de 10 Gbit/s. En plus de la capacité Ethernet haut débit, les deux dispositifs intègrent des fonctionnalités qui rationalisent les communications vers et depuis les SoC multicœurs hôtes par le biais d'interfaces PCIe qui mettent en œuvre des capacités Gen3 dans le cas du TC9563, ainsi qu'une virtualisation d'E/S à voie unique (Single-Route I/O Virtualization, SR IOV), une fonction qui améliore les performances des logiciels exécutés sous un hyperviseur.

Dans les environnements automobile et d'automatisation industrielle, la combinaison de performances temps réel et de communications à large bande passante devient une exigence clé. La mise en œuvre des améliorations TSN d'Ethernet dans des puces telles que les TC9562 et TC9563 de Toshiba garantit que les équipementiers et les intégrateurs système disposent de ce dont ils ont besoin pour déployer des réseaux temps réel à large bande passante dans les véhicules et les équipements d'usine avancés. ■